



TESIS- SF2006

# ANALISIS TOMOGRAFI SEISMIK 3D BAWAH PERMUKAAN WILAYAH JEPANG MENGGUNAKAN *LOCAL EARTHQUAKE TOMOGRAPHY*

INDRAWATI WILUJENG  
NRP 1113201029

DOSEN PEMBIMBING  
Prof. Dr. rer-nat. Bagus Jaya Santosa, S.U

PROGRAM MAGISTER  
BIDANG KEAHLIAN GEOFISIKA  
JURUSAN FISIKA  
FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM  
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER  
SURABAYA  
2015



TESIS- SF2006

# 3D SEISMIC TOMOGRAPHY ANALYSIS OF JAPAN SUBSTRUCTURE USING LOCAL EARTHQUAKE TOMOGRAPHY

INDRAWATI WILUJENG  
NRP 1113201029

DOSEN PEMBIMBING  
Prof. Dr. rer-nat. Bagus Jaya Santosa, S.U

MAGISTER PROGRAM  
STUDY ON GEOPHYSICS  
PHYSICS DEPARTMENT  
FACULTY OF MATHEMATICS AND NATURAL SCIENCES  
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER  
SURABAYA  
2015



## LEMBAR PENGESAHAN TESIS

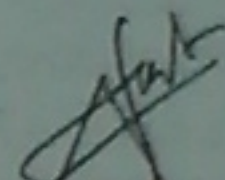
Tesis disusun untuk memenuhi salah satu syarat memperoleh gelar  
Magister Sains (M.Si)  
di  
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

oleh :  
Indrawati Wilujeng  
NRP. 1113201029

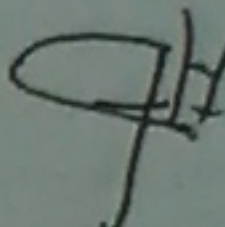
Tanggal Ujian : 2 Juli 2015  
Periode Wisuda : September 2015

Disetujui oleh :

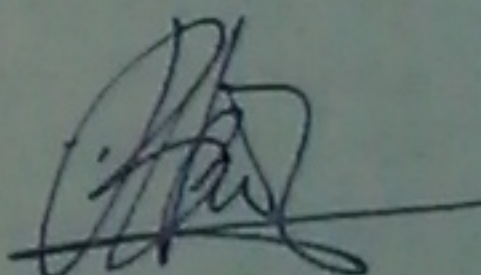
1. Prof. Dr. rer-nat. Bagus Jaya Santosa, SU  
NIP: 19620802 198701 1 001

  
(Pembimbing)

2. Dr. rer-nat. Eko Minarto, M.Si  
NIP: 19750205 199903 1 004

  
(Penguji)

3. Dr. Bintoro Anang Subagyo, M.Si  
NIP: 19790716 200501 1 002

  
(Penguji)

  
Direktur Program Pascasarjana,  
Prof. Dr. Ir. Adi Soeprijanto, M.T  
NIP: 19640405 199002 1 001  
PROGRAM  
PASCASARJANA



# **ANALISIS TOMOGRAFI SEISMIK 3D BAWAH PERMUKAAN WILAYAH JEPANG MENGGUNAKAN *LOCAL EARTHQUAKE TOMOGRAPHY***

**Nama Mahasiswa : Indrawati Wilujeng**

**NRP : 1113201029**

**Dosen Pembimbing : Prof. Dr. rer-nat. Bagus Jaya Santosa, S.U**

## **ABSTRAK**

Jepang yang berada dalam kawasan *Ring of Fire* menyebabkan wilayah Jepang sering dilanda gempa bumi. Di kawasan tersebut, ada tiga lempeng tektonik yang berada di bawah permukaan wilayah Jepang. Untuk mengetahui kondisi bawah permukaan zona pertemuan ketiga lempeng tektonik sebagai sumber utama gempa di Jepang dapat dilakukan sebuah metode tomografi seismik. Metode ini merupakan metode pengembangan karakteristik model 1D menjadi model kecepatan 3D berdasarkan data gelombang seismik. Data masukan yang digunakan yaitu data gempa tektonik yang terjadi di Jepang dalam rentang waktu mulai tanggal 1 Januari 2010 sampai dengan 1 Januari 2011. Tercatat 69 event yang terjadi dan digunakan dalam pengolahan data. Tahapan-tahapan dalam penelitian ini yaitu *picking* gelombang P dan S dengan menggunakan SeisGram2K60, mendapatkan model kecepatan bumi yang baru menggunakan *software* VELEST, kemudian merelokasi hiposenter dengan *software* HypoDD, untuk selanjutnya dilakukan inversi tomografi *Local Earthquake Tomography* menggunakan *software* LOTOS 12. Hasil pengolahan data menunjukkan bahwa pada bagian kerak atas Vp sekitar 5,961 km/s sampai 7,000 km/s dan Vs sekitar 3,461 km/s sampai 4,166 km/s, pada bagian kerak bawah Vp sekitar 7,461 km/s dan Vs sekitar 4,230 km/s sampai 4,358 km/s, dan pada bagian mantel atas Vp sekitar 7,461 km/s sampai 7,692 km/s dan Vs sekitar 4,423 km/s. Pada bidang vertikal rasio Vp/Vs rendah diperoleh mayoritas pada kedalaman sekitar 20-60 km, sedangkan rasio Vp/Vs tinggi berada pada mayoritas kedalaman 0-50 km. Pada citra anomali 3D adanya variasi Vp dan Vs di bagian selatan Pulau Honshu, Jepang yang cenderung memiliki anomali negatif dikarenakan terdapat tiga lempeng tektonik yang bertumbukan seperti lempeng Eurasia bagian timur, Laut Filipina, dan lempeng laut Pasifik bagian barat. Selain itu terdapat beberapa pegunungan dan gunung di wilayah tersebut, antara lain Gunung Fuji, Gunung Zao, dan Pegunungan Bandai.

**Kata kunci :** Tomografi Seismik, Model Kecepatan 3D, *Local Earthquake Tomography*.

*(halaman ini sengaja dikosongkan)*

# **3D SEISMIC TOMOGRAPHY ANALYSIS OF JAPAN SUBSTRUCTURE USING *LOCAL EARTHQUAKE TOMOGRAPHY***

**By : Indrawati Wilujeng**  
**Student Identity Number: 1113201029**  
**Supervisor : Prof. Dr. rer-nat. Bagus Jaya Santosa, S.U**

## **ABSTRACT**

Japan which located in the Ring of Fire region causing Japan frequently hit by earthquakes. In these areas, there are three tectonic plates under the surface region of Japan. To determine the condition of the subsurface zone of the third meeting of tectonic plates as the main source of the earthquake in Japan, we can do a seismic tomography method. This method is a development of characteristic 1D models into a 3D velocity model based on seismic wave data. The input data used are the data of tectonic earthquake that occurred in Japan in the time range from 1 January 2010 to 1 January 2011. Recorded 69 events that occurred and are used in data processing. The steps in this study are picking P and S waves using SeisGram2K60, getting a new velocity model of earth using software VELEST, then relocated hypocenter using HypoDD software, for further tomographic inversion Local Earthquake Tomography using software Lotos-12. The result show that in upper crust have  $V_p$  is 5.961 km/s until 7.000 km/s and  $V_s$  is 3.461 km/s until 4.166 km/s, in lower crust have  $V_p$  is 7.461 km/s and  $V_s$  is 4.230 km/s until 4.358 km/s, in upper mantle have  $V_p$  is 7.461 km/s sampai 7.692 km/s and  $V_s$  is 4.423 km/s. In the vertical plane, minimum  $V_p/V_s$  ratio obtainable in depth 0 km – 30 km while high  $V_p/V_s$  ratio obtainable in depth 40 km – 60 km. 3D tomography have anomaly variation of  $V_p$  and  $V_s$  in South of Honshu Island, Japan that have negative anomaly because of subduction between Eastern Eurasia plate, Philipines Sea, and western Pasific Ocean plate. Besides, there are several mounts and mountain around that area, such as Fuji Mount, Zao Mount, and Bandai Mountain.

**Key words:** Seismic Tomography, 3D Velocity Model, Local Earthquake Tomography.

*(halaman ini sengaja dikosongkan)*

## KATA PENGANTAR

Puji syukur kehadiran Allah SWT Tuhan semesta alam yang senantiasa memberikan rahmat dan hidayat-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan tesis yang berjudul “*Analisis Tomografi Seismik 3D Pada Bawah Permukaan Wilayah Jepang Menggunakan Local Earthquake Tomography*”, sebagai salah satu persyaratan untuk menyelesaikan pendidikan program strata dua (S2) Jurusan Fisika, Fakultas MIPA, Institut Teknologi Sepuluh Nopember.

Penyusunan tesis ini tidak lepas dari bantuan berbagai pihak, oleh karena itu penulis ingin menyampaikan ucapan terima kasih kepada:

1. Prof. Dr. rer-nat. Bagus Jaya Santosa, SU., selaku Dosen Pembimbing tesis dan Dosen wali yang telah meluangkan waktu, pikiran, bimbingan dalam penulisan tesis ini;
2. Dr. rer-nat Eko Minarto, M.Si., selaku Dosen Penguji I dan Dr. Bintoro Anang Subagyo, M.Si., selaku Dosen Penguji II yang telah meluangkan waktu, pikiran, perhatian, bimbingan, kritik dan saran demi kesempurnaan tesis ini;
3. Seluruh staf pengajar Jurusan Fisika dan Fakultas MIPA Institut Teknologi Sepuluh Nopember juga Pak Kiswanto selaku staff laboratorium Geofisika yang telah memberikan dukungan dan saran dalam mengerjakan tesis.
4. Dr. Ivan Kaulakov selaku pembuat perangkat lunak LOTOS-12 Institut of Petroleum Geology dan Geophysics, Russia yang telah bersedia berdiskusi dan memberikan saran hingga tesis ini selesai.
5. Ayahanda (Tariman) dan Ibunda tersayang (Murti), Mas Tono, dan Om No yang telah mendoakan dan memberikan semangat dalam penyelesaian tesis.
6. Teman-teman Laboratorium Geofisika, Pak Arif yang telah mengajari cara mengoperasikan hypoDD, Arya yang telah mengajari GMT, Uswatun yang telah mengajari cara mengoperasikan VELEST, Mbak Susi, Mbak Nisa, Diah, dan teman-teman pascasarjana fisika yang telah memberikan perhatian, doa dan semangat dalam menyelesaikan tesis.



Penulis juga menerima segala kritik dan saran dari semua pihak demi kesempurnaan tesis ini. Akhirnya penulis berharap semoga tesis ini dapat bermanfaat.

Surabaya, Juni 2015

Penulis

## DAFTAR ISI

	Halaman
<b>ABSTRAK .....</b>	<b>i</b>
<b>ABSTRACT .....</b>	<b>iii</b>
<b>KATA PENGANTAR .....</b>	<b>v</b>
<b>DAFTAR ISI .....</b>	<b>vii</b>
<b>DAFTAR TABEL .....</b>	<b>ix</b>
<b>DAFTAR GAMBAR.....</b>	<b>xi</b>
<b>DAFTAR LAMPIRAN.....</b>	<b>xiii</b>
 <b>BAB 1 PENDAHULUAN .....</b>	 <b>1</b>
1.1 Latar Belakang .....	1
1.2 Rumusan Masalah .....	2
1.3 Tujuan Penelitian .....	3
1.4 Batasan Masalah .....	3
1.5 Sitematika Penulisan .....	3
 <b>BAB 2 TINJAUAN PUSTAKA .....</b>	 <b>5</b>
2.1 Geologi Umum Jepang .....	5
2.2 Gelombang Seismik .....	6
2.2.1 <i>Body Wave</i> .....	7
2.2.2 <i>Surface Wave</i> .....	8
2.3 Pembaharuan Model Kecepatan 1D .....	9
2.4 Penentuan Hiposenter .....	10
2.5 Tomografi Seismik.....	13
2.5.1 Pengertian Tomografi Seismik.....	13
2.5.2 Jenis Pemodelan Tomografi Seismik .....	13
2.5.3 Metode Tomografi Seismik .....	14
 <b>BAB 3 METODE PENELITIAN .....</b>	 <b>21</b>
3.1 Alat .....	21
3.2 Data Penelitian .....	21
3.3 Pemilihan Data .....	21
3.3 Rancangan Penelitian .....	22
3.4 Prosedur Penelitian .....	23
3.3.1 Studi Pustaka .....	23
3.3.2 <i>Picking Data</i> .....	23
3.3.3 Pembaharuan Model Kecepatan 1D .....	23
3.3.4 Persiapan Penentuan Hiposenter .....	23
3.3.5 Persiapan <i>File Data Input</i> .....	24
3.3.6 Penentuan Parameter Inversi Tomografi .....	24
3.3.7 Penetuan <i>Iterasi dan Output Display</i> .....	24
 <b>BAB 4 HASIL DAN PEMBAHASAN.....</b>	 <b>25</b>
4.1 Pengumpulandan Persiapan Data.....	25
4.2 <i>Picking Data</i> .....	26

4.3	Pembaharuan Model Kecepatan 1D.....	27
4.4	Hasil Relokasi Hiposenter.....	29
4.5	Hasil Inversi Tomografi.....	37
	4.1.1 Analisis Distribusi Kecepatan 3D.....	38
	4.1.2 Analisis Struktur Vp/Vs.....	47
<b>BAB 5 KESIMPULAN DAN SARAN.....</b>		<b>51</b>
5.1	Kesimpulan.....	51
5.2	Saran.....	52
<b>DAFTAR PUSTAKA .....</b>		<b>53</b>
<b>LAMPIRAN .....</b>		<b>55</b>

## DAFTAR TABEL

	<b>Halaman</b>
Tabel 2.1 Model Referensi Struktur Kecepatan Bumi Wilayah Jepang.....	9
Tabel 4.1 Hasil Pembaharuan Model Kecepatan Bumi untuk Wilayah Jepang.....	29
Tabel 4.2 Hasil Relokasi Hiposenter .....	30
Tabel 4.3 Perubahan <i>Origin time</i> dan Nilai RMS .....	32

*(halaman ini sengaja dikosongkan)*



## DAFTAR GAMBAR

	Halaman
Gambar 2.1 Jepang terletak Jepang terletak pada pertemuan tiga lempeng tektonik besar, yaitu lempeng Eurasia bagian timur, Laut Filipina, dan Pasifik bagian barat .....	5
Gambar 2.2 Peta letak stasiun pencatat gempa di Jepang.....	6
Gambar 2.3 Arah rambat gelombang P dan S .....	7
Gambar 2.4 Gelombang <i>Rayleigh</i> .....	9
Gambar 2.5 Gelombang <i>Love</i> .....	9
Gambar 2.6 Algoritma <i>Double-Difference</i> .....	11
Gambar 2.7 Perbedaan pemodelan ke depan ( <i>forward modelling</i> ) dan pemodelan inverse ( <i>inverse modelling</i> ) .....	14
Gambar 2.8 Prinsip kerja LOTOS .....	15
Gambar 2.9 Langkah utama optimisasi kecepatan 1D dan lokasi awal sumber .....	16
Gambar 3.1 Diagram alur penelitian .....	22
Gambar 4.1 Peta persebaran gempa dan stasiun .....	25
Gambar 4.2 Ekstraksi menggunakan JrdseedVer0.10.1 .....	26
Gambar 4.3 Proses <i>picking</i> data menggunakan Seisgram2K60 .....	27
Gambar 4.4 Variasi kecepatan gelombang P terhadap kedalaman .....	28
Gambar 4.5 Variasi kecepatan gelombang S terhadap kedalaman .....	28
Gambar 4.6 Posisi gempa sebelum dan sesudah relokasi .....	35
Gambar 4.7 Posisi relokasi hiposenter tampak samping.....	35
Gambar 4.8 Posisi relokasi hiposenter dalam penampang 3D.....	36
Gambar 4.9 Posisi pembagian <i>cluster</i> sesudah relokasi .....	37
Gambar 4.10 Model kecepatan bumi 1D .....	38
Gambar 4.11 Distribusi anomali Vp pada irisan horizontal tomogram pada kedalaman (a) 10 km, (b) 20 km, (c) 30 km, (d) 40 km, (e) 50 km, (f) 60 km, (g) 70 km, (h) 80 km dan (i) 90 km .....	40
Gambar 4.12 Distribusi anomali Vs pada irisan horizontal tomogram pada kedalaman (a) 10 km, (b) 20 km, (c) 30 km, (d) 40 km, (e) 50 km, (f) 60 km, (g) 70 km, (h) 80 km dan (i) 90 km .....	41
Gambar 4.13 Garis <i>cross section</i> untuk menampilkan distribusi Vp dan Vs dan rasio Vp/Vs pada irisan vertikal .....	42
Gambar 4.14 Anomali Vp pada irisan vertikal.....	43
Gambar 4.15 Anomali Vs pada irisan vertikal.....	44
Gambar 4.16 Anomali kecepatan absolut gelombang P pada irisan vertikal.....	45
Gambar 4.17 Anomali kecepatan absolut gelombang S pada irisan vertikal.....	45

Gambar 4.18	Distribusi rasio $V_p/V_s$ pada irisan horizontal tomogram pada kedalaman (a) 10 km, (b) 20 km, (c) 30 km, (d) 40 km, (e) 50 km, (f) 60 km, (g) 70 km, (h) 80 km dan (i) 90 km.....	47
Gambar 4.19	Distribusi rasio $V_p/V_s$ pada irisan vertikal.....	48

## DAFTAR LAMPIRAN

		Halaman
Lampiran 1	Data Gempa dari NIED .....	57
Lampiran 2	Data Stasiun .....	59
Lampiran 3	Data <i>Travel Times</i> .....	61
Lampiran 4	Biografi Penulis.....	79

*(halaman ini sengaja dikosongkan)*

# BAB 1

## PENDAHULUAN

### 1.1. Latar Belakang

Jepang adalah salah satu wilayah di wilayah Asia Timur yang terpisah dari daratan Asia. Secara astronomis, Jepang terletak pada  $30^{\circ}$  LU- $46^{\circ}$  LU dan  $128^{\circ}$  BT- $149^{\circ}$  BT. Dengan letak astronomis tersebut, Jepang berada pada pertemuan tiga lempeng tektonik besar yang bergerak setiap saat, yaitu lempeng Eurasia bagian timur, Laut Filipina, dan lempeng laut Pasifik bagian barat. Ketika lempeng Eurasia bagian timur bertumbukan dengan lempeng laut Pasifik bagian barat, maka lempeng laut Pasifik tersebut akan menelusup ke bawah lempeng Eurasia yang mengakibatkan terbentuknya *megathrust*. Sebagai wilayah yang terletak di atas *megathrust* dan berada dekat dengan palung (*trench*) sebagai batas lempeng, maka tidak mengherankan jika Jepang menjadi kawasan yang rawan gempa.

Salah satu cara untuk dapat mengetahui kondisi bawah permukaan zona pertemuan ketiga lempeng tektonik sebagai sumber utama gempa di Jepang tersebut yaitu dengan metode tomografi seismik. Iyer dan Hirahara (1993, hal. 2) mengatakan bahwa sebagian besar gambar dari tomografi seismik didasarkan pada distribusi kecepatan gelombang gempa yang ditentukan dengan data waktu tiba gelombang gempa. Tien-when dan Philip (1994, hal. 1) melengkapi definisi tomografi seismik sebagai teknik pencitraan yang menghasilkan gambar dari suatu objek dengan memanfaatkan respon objek terhadap energi eksternal yang bersifat non-destruktif. Energi eksternal yang dimaksud bisa berupa energi buatan ataupun energi alami berupa gempa bumi. Dari kedua definisi tersebut, maka dapat disimpulkan bahwa tomografi seismik adalah salah satu metode geofisika dalam teknik pencitraan yang menghasilkan gambar dari suatu objek (dalam hal ini yaitu bumi) berdasarkan waktu tiba gelombang gempa yang terjadi di seluruh dunia.

Tomografi seismik sendiri dibagi menjadi dua jenis pemodelan, yaitu tomografi pemodelan ke depan (*forward modelling*) dan pemodelan inversi (*inverse modelling*). Pada penelitian ini, tomografi seismik yang digunakan yaitu



tomografi seismik dengan pemodelan inversi karena parameter model telah didapat secara langsung dari data seismik.

Metode tomografi seismik menggunakan parameter kecepatan dari gelombang P ( $V_p$ ) dan gelombang S ( $V_s$ ) pada gelombang seismik. Metode inilah yang akan digunakan untuk mendapatkan informasi mengenai kondisi bawah permukaan Jepang berdasarkan waktu tiba gelombang-gelombang gempa yang telah direkam oleh 84 stasiun pencatat gempa yang tersebar di seluruh wilayah Jepang. Selanjutnya dari hasil pengolahan dan analisis parameter tersebut, akan didapatkan pencitraan struktur 3D secara rinci dari bawah permukaan wilayah Jepang.

Untuk memudahkan peneliti dalam mendapatkan pencitraan yang baik dari kondisi bawah permukaan suatu wilayah, maka diperlukan adanya alat bantu berupa *software* tertentu. Ada beberapa *software* yang diperkenalkan untuk mendapatkan pencitraan tomografi suatu daerah dari pengolahan data seismik, salah satunya yaitu *Local Tomography Software* (LOTOS). LOTOS didesain untuk menginversi struktur kecepatan gelombang P dan S yang simultan serta koordinat sumber gempa untuk mendapatkan pencitraan dari kondisi bawah permukaan daerah gempa. Algoritma LOTOS juga dapat dengan mudah diaplikasikan untuk berbagai set data tanpa pemrosesan parameter yang rumit (Koulakov, 2009). Dengan menggunakan *software* tersebut, diharapkan akan didapat pencitraan struktur 3D bawah permukaan wilayah Jepang secara rinci.

## **1.2. Rumusan Masalah**

Berdasarkan latar belakang di atas dapat diambil rumusan masalah sebagai berikut:

1. Bagaimana menentukan distribusi anomali kecepatan gelombang P ( $V_p$ ), gelombang S ( $V_s$ ), dan rasio  $V_p/V_s$ ?
2. Bagaimanakah pencitraan tomografi bawah permukaan wilayah Jepang dengan menggunakan *Local Earthquake Tomography*?

### **1.3. Tujuan Penelitian**

Berdasarkan rumusan masalah di atas, tujuan dari penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Mendapatkan distribusi anomali kecepatan gelombang P ( $V_p$ ), gelombang S ( $V_s$ ), dan rasio  $V_p/V_s$ .
2. Memperoleh pencitraan tomografi bawah permukaan wilayah Jepang dengan menggunakan *Local Earthquake Tomography*.

### **1.4 Batasan Masalah**

Adapun batasan masalah dalam penelitian ini yaitu:

1. Data yang digunakan dalam penelitian ini adalah data seismik yang telah terekam oleh stasiun pencatat gempa yang tersebar di seluruh wilayah Jepang, dalam rentang waktu mulai tanggal 1 Januari 2010 sampai dengan 1 Januari 2011.
2. Pengolahan data awal untuk mendapatkan waktu tiba dari gelombang P ( $T_p$ ) dan gelombang S ( $T_s$ ) dengan menggunakan *software* SeisGram2K60.
3. Penentuan Hiposenter dilakukan dengan menggunakan *software* HypoDD.
4. Proses inversi tomografi dilakukan oleh *software* LOTOS 12.
5. Wilayah Jepang yang menjadi fokus penelitian yaitu terletak pada  $30^\circ$  LU- $46^\circ$  LU dan  $128^\circ$  BT- $149^\circ$  BT.

### **1.5 Sistematika Penulisan**

Secara garis besar sistematika penulisan tesis ini terdiri dari lima bab. Bab 1: Pendahuluan yang meliputi latar belakang, rumusan masalah, tujuan penelitian, batasan masalah, dan sistematika penulisan. Bab 2: Kajian Teori yang di dalamnya berisi pemaparan teori-teori pendukung yang dijadikan landasan penyusunan tesis ini. Bab 3: Metode Penelitian yang memaparkan prosedur kerja yang digunakan dalam penelitian ini. Bab 4: Hasil dan Pembahasan yang berisi tentang hasil dan analisis data yang telah diperoleh selama penelitian. Bab 5. Penutup yang berisi kesimpulan dan saran.

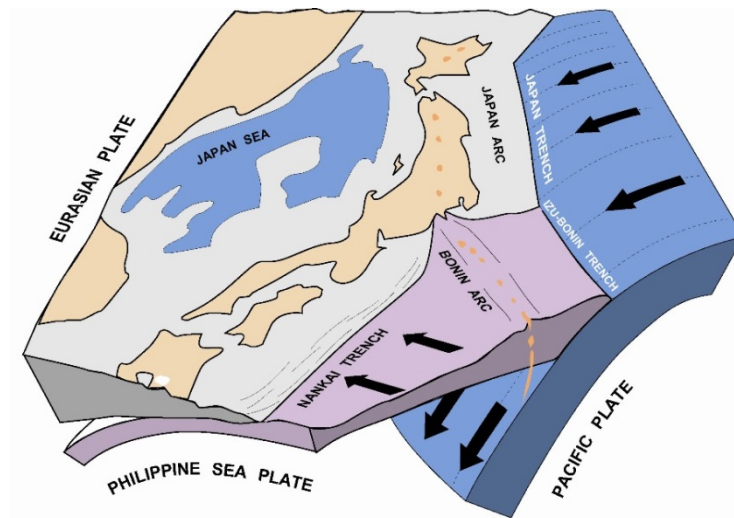
*(halaman ini sengaja dikosongkan)*

## BAB 2

### TINJAUAN PUSTAKA

#### 2.1 Geologi Umum Jepang

Jepang adalah salah satu wilayah kepulauan di kawasan Asia Timur yang terpisah dari daratan Asia. Secara astronomis, Jepang terletak pada  $30^{\circ}$  LU- $46^{\circ}$  LU dan  $128^{\circ}$  BT- $149^{\circ}$  BT. Dengan letak astronomis tersebut, Jepang berada pada pertemuan tiga lempeng tektonik besar yang bergerak setiap saat, yaitu lempeng Eurasia bagian timur, Laut Filipina, dan lempeng laut Pasifik bagian barat seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.1.



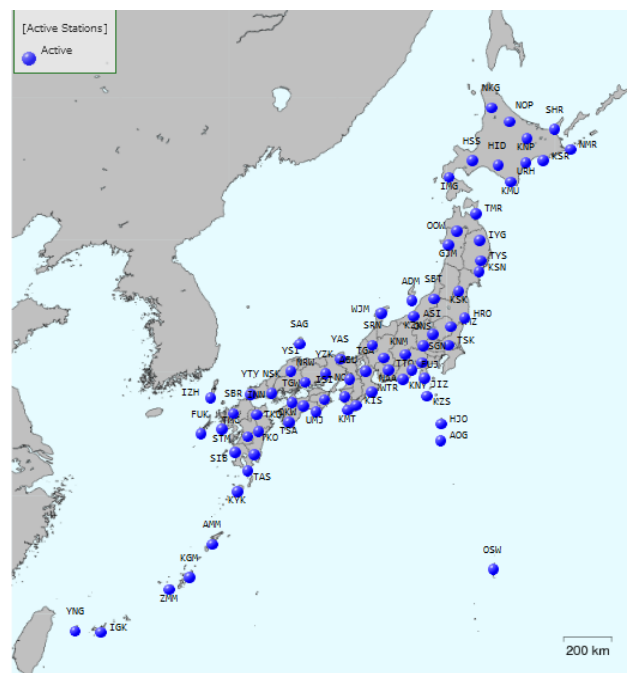
Gambar 2.1 Jepang terletak pada pertemuan tiga lempeng tektonik besar, yaitu lempeng Eurasia bagian timur, Laut Filipina, dan Pasifik bagian barat

(Sumber: <http://www.bmkg.stageoflampung.com>)

Ketika lempeng Eurasia bagian timur bertumbukan dengan lempeng laut Pasifik bagian barat, maka lempeng laut Pasifik tersebut akan menelusup ke bawah lempeng Eurasia yang mengakibatkan terbentuknya *megathrust*. Sebagai wilayah yang terletak di atas *megathrust* dan berada dekat dengan palung (*trench*) sebagai batas lempeng, Jepang menjadi kawasan yang rawan gempa. Selain itu,

struktur tanah di dasar Samudera Pasifik yang labil sering menimbulkan gempa di dasar laut yang mengakibatkan sering terjadinya tsunami.

Dengan menggunakan metode tomografi seismik dapat diketahui pencitraan dari bawah permukaan wilayah Jepang. Metode tomografi seismik menggunakan parameter kecepatan dari gelombang P dan gelombang S pada gelombang seismik. Gelombang seismik yang dimaksud yaitu gelombang seismik yang telah terekam di lebih kurang 84 stasiun pencatat gempa yang tersebar di seluruh wilayah Jepang seperti yang terlihat pada Gambar 2.2.



Gambar 2.2 Peta letak stasiun pencatat gempa di Jepang

Namun gempa yang terjadi tidak terdeteksi pada semua stasiun pencatat gempa tersebut, melainkan hanya beberapa saja. Tercatat atau tidaknya sebuah gempa pada stasiun pencatat gempa bergantung pada jarak antara episentral dengan stasiun pencatat gempa.

## 2.2 Gelombang Seismik

Gelombang seismik adalah bentuk gelombang elastis yang menjalar dengan bumi sebagai mediumnya. Gelombang ini merambat sebagai reaksi dari adanya gangguan di dalam kerak bumi, misalnya adanya patahan atau ledakan.



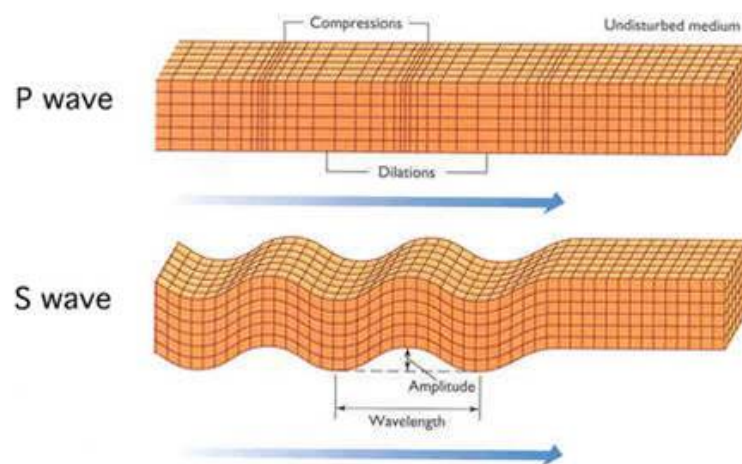
Energi ini akan merambat ke seluruh bagian bumi dan dapat terekam oleh seismometer (Erwin, 2010). Berdasarkan tempat penjalarannya, gelombang seismik dibedakan menjadi dua macam, yaitu gelombang badan (*body wave*) dan gelombang permukaan (*surface wave*).

### 2.2.1 *Body Wave*

*Body wave* adalah gelombang yang merambat melalui sela-sela bebatuan di dalam medium bumi. Ada dua jenis gelombang badan yang menjalar di dalam permukaan bumi yaitu gelombang P dan gelombang S (Gylfy dkk., 1991). Kedua gelombang tersebut membantu ahli seismologi untuk menentukan hiposenter dan episenter.

#### 2.2.1.1 Gelombang P (*Pressure Wave*)

Gelombang P adalah gelombang yang disebabkan oleh terjadinya gempa bumi dan terekam oleh seismometer. Gelombang P merupakan gelombang longitudinal yang arah rambatnya sejajar dengan arah getarnya (Gambar 2.3).



Gambar 2.3 Arah rambat gelombang P dan S

Gelombang P disebut juga sebagai gelombang tekanan yang dapat merambat pada media padat dan cair. Gelombang ini merupakan gelombang yang paling tinggi kecepatannya dibandingkan dengan gelombang-gelombang seismik lainnya, yakni sekitar 6 - 7 km/s, sehingga gelombang inilah yang pertama kali tiba pada tiap stasiun pengukuran seismik. Menurut Kayal (2002), kecepatan gelombang P ( $V_p$ ) dapat dirumuskan sebagai berikut:

$$V_p = \sqrt{\frac{\lambda + 2\mu}{\rho}} \quad (2.1)$$

dengan  $\lambda$  adalah konstanta elastisitas volume,  $\mu$  adalah modulus rigiditas, sedangkan  $\rho$  adalah rapat jenis.

#### 2.2.1.2 Gelombang S (*Shear Wave*)

Gelombang S merupakan gelombang transversal yang diakibatkan oleh eksitasi gempa bumi yang arah rambatnya tegak lurus dengan arah getarnya (Gambar 2.3). Gelombang S disebut juga sebagai gelombang geser yang hanya bisa merambat dengan menembus batuan. Gelombang S merambat di sela-sela bebatuan yang padat dengan kecepatan 3,5 km/s, sehingga gelombang ini akan tiba setelah gelombang P pada tiap stasiun pengukuran seismik. Menurut Gubbins (1990), kecepatan gelombang S ( $V_s$ ) dapat dirumuskan sebagai berikut:

$$V_s = \sqrt{\frac{\mu}{\rho}} \quad (2.2)$$

Perbandingan antara cepat rambat gelombang P dan gelombang S akan menghasilkan suatu konstanta yang disebut dengan *Poisson ratio*.

$$\frac{V_p}{V_s} = \sqrt{\frac{2(1-\sigma)}{(1-2\sigma)}} \quad (2.3)$$

sehingga

$$\sigma = \frac{1}{2} \left[ 1 - \frac{1}{\left(\frac{V_p}{V_s}\right)^2 - 1} \right] \quad (2.4)$$

dengan  $\sigma$  adalah *Poisson ratio*.

### 2.2.2 Surface wave

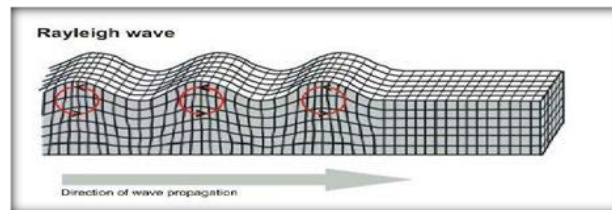
*Surface wave* adalah gelombang yang merambat sepanjang permukaan bumi. Bersifat merusak dikarenakan frekuensinya yang lebih rendah dari *body wave*. Ada dua jenis gelombang permukaan, yaitu gelombang *Rayleigh* dan gelombang *Love*.

#### 2.2.2.1 Gelombang Rayleigh

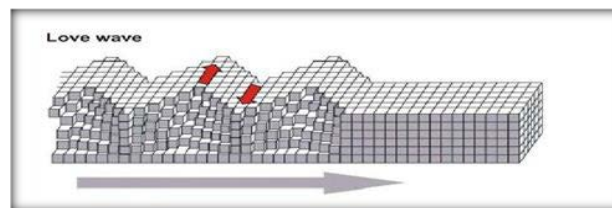
Gelombang *Rayleigh* adalah gelombang permukaan yang pergerakannya menyerupai ellips (Gambar 2.4). Gelombang ini dicirikan dengan amplitudo yang besar dan frekuensinya yang rendah. Namun, amplitudo gelombangnya berbanding terbalik dengan kedalaman.

### 2.2.2.2 Gelombang *Love*

Gelombang *Love* adalah gelombang permukaan yang terpolarisasi secara horizontal dan tidak menghasilkan perpindahan secara vertikal (Gambar 2.5). Pada umumnya, kecepatan kedua gelombang permukaan ini selalu lebih kecil dari gelombang P dan S.



Gambar 2.4 Gelombang *Rayleigh*



Gambar 2.5 Gelombang *Love*

## 2.3 Pembaharuan Model Kecepatan 1D

Model kecepatan 1D sangat diperlukan untuk kalkulasi waktu tempuh pada proses relokasi hiposenter. Model kecepatan tersebut kemudian akan diperbaharui dengan tujuan untuk meminimalisasi kesalahan kalkulasi waktu tempuh dalam penentuan hiposenter. Model kecepatan bumi untuk wilayah Jepang ditunjukkan oleh Tabel 2.1.

Tabel 2.1 Model referensi struktur kecepatan bumi wilayah Jepang

Kedalaman (km)	V <sub>p</sub> (km/s)	V <sub>s</sub> (km/s)
0	5,50	3,14
3	6,00	3,55
18	6,70	3,83
33	7,80	4,46
100	8,00	4,57
225	8,40	4,80
325	8,60	4,91
425	9,30	5,31

Proses pembaharuan model kecepatan 1D ini dilakukan dengan menggunakan *software* VELEST. Prinsip dari *software* ini yaitu dengan menggunakan metode *coupled-velocity hypocenter*. Metode ini merupakan penggabungan antara metode relokasi hiposenter dan koreksi stasiun menggunakan metode Geiger. Persamaan yang digunakan untuk memperoleh model kecepatan adalah sebagai berikut (Kissling, 1994):

$$r = t_{obs} - t_{cal} = \sum_{k=1}^4 \frac{\partial f}{\partial h_k} \Delta h_k + \sum_{i=1}^n \frac{\partial f}{\partial m_i} \Delta m_i + e \quad (2.5)$$

Keterangan:

$r$  = residual waktu tempuh observasi dan waktu tempuh kalkulasi

$t_{obs}$  = waktu tempuh observasi;  $t_{cal}$  = waktu tempuh kalkulasi

$f$  = fungsi terhadap (s, h, m), dimana s = lokasi stasiun; h = lokasi hiposenter dan *origin time*; m = model kecepatan

$e$  = koreksi stasiun

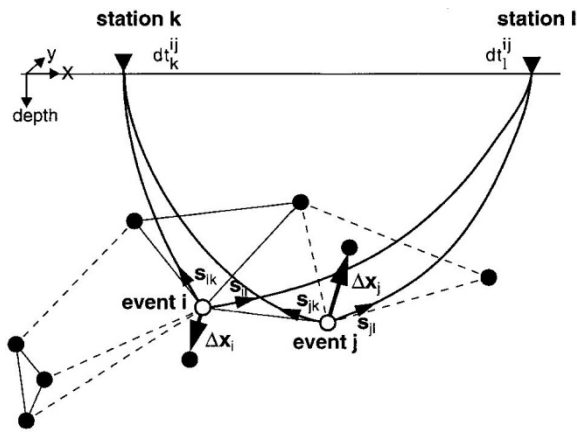
$k$  = jumlah hiposenter;  $i$  = jumlah stasiun

Setelah mendapatkan nilai residual, selanjutnya dilakukan *forward modelling* pada nilai tersebut untuk mendapatkan nilai  $t_{cal}$  baru. Kemudian nilai  $t_{cal}$  baru tersebut dibandingkan misfitnya dengan  $t_{cal}$  yang sebelumnya telah didapat. Jika dalam satu iterasi tersebut masih didapatkan nilai RMS yang besar, maka perlu dilakukan iterasi kembali sehingga akan diperoleh nilai RMS yang lebih kecil dan mendekati nol.

## 2.4 Penentuan Hiposenter

Hiposenter adalah lokasi dari sumber gempa. Lokasi tersebut pada umumnya dituliskan dengan *longitude* ( $x_o$ ), *latitude* ( $y_o$ ), kedalaman ( $z_o$ ), dan waktu asal ( $t_o$ ). Secara umum, ada tiga macam metode yang dapat digunakan untuk menentukan hiposenter, antara lain *Single Event Determination* (SED), *Joint Hypocenter Determination* (JHD), dan *Double Difference* (DD). Pada penelitian ini metode yang akan digunakan yaitu *Double Difference* (DD) dengan menggunakan bantuan *software* HypoDD untuk merelokasi hiposenter.

Prinsip dari metode *Double Difference* yaitu menggunakan data waktu tempuh antara dua gempa bumi yang letak hiposenternya berdekatan. Jika jarak antara dua hiposenter gempa bumi sangat kecil dibandingkan dengan jarak hiposenter terhadap stasiun, maka dapat dianggap bahwa *raypath* kedua gempa bumi tersebut mendekati sama. Dengan demikian, maka dapat diasumsikan bahwa selisih waktu tempuh antara dua gempa bumi yang terekam terhadap stasiun yang sama merupakan fungsi jarak antara kedua hiposenter, sehingga kesalahan model kecepatan dapat diminimalisasi meskipun tanpa menggunakan koreksi stasiun.



Gambar 2.6 Algoritma *Double Difference*

Gambar 2.6 merupakan ilustrasi dari algoritma relokasi hiposenter menggunakan *Double Difference*. Lingkaran hitam dan putih merupakan hiposenter awal yang dihubungkan dengan gempa-gempa yang berasal dari korelasi silang (garis lurus) atau data katalog (garis putus-putus). Gempa yang berdekatan, gempa  $i$  dan gempa  $j$  ditunjukkan dengan lingkaran putih. Kedua gempa tersebut terekam oleh stasiun  $k$  dan  $l$  dengan selisih waktu  $dt_k^{ij}$  dan  $dt_l^{ij}$  (Waldhauser dan Ellsworth, 2000).

Residual antara waktu tempuh observasi dan kalkulasi dari dua gempa yang berdekatan dapat dinyatakan dengan persamaan:

$$dr_k^{ij} = (t_k^i - t_k^j)^{obs} - (t_k^i - t_k^j)^{cal} \quad (2.6)$$

dengan  $dr_k^{ij}$  adalah nilai residual,  $(t_k^i - t_k^j)^{obs}$  adalah waktu tempuh gelombang berdasarkan observasi antara gempa  $i$  dan gempa  $j$  terhadap stasiun  $k$ , dan

$(t_k^i - t_k^j)^{cal}$  adalah waktu tempuh gelombang berdasarkan kalkulasi antara gempa  $i$  dan gempa  $j$  terhadap stasiun  $k$ .

Untuk mempermudah penyelesaian maka diasumsikan bahwa model kecepatan telah mewakili keadaan sebenarnya, dan pembacaan waktu tiba telah tepat. Linearisasi dari permasalahan tersebut dapat dituliskan sebagai berikut:

$$dr_k^{ij} = \frac{\partial t_k^i}{\partial m} \Delta m^i - \frac{\partial t_k^j}{\partial m} \Delta m^j \quad (2.7)$$

$\Delta m$  adalah perubahan model hiposenter yang terdiri dari empat parameter hiposenter  $(x, y, z, t)$ .

Jika persamaan (2.7) disusun untuk semua *event* dalam satu *cluster* dan dinyatakan dalam bentuk matriks, maka akan menjadi sebagai berikut:

$$WG\Delta m = W\Delta d \quad (2.8)$$

Matriks  $G$  adalah matriks Jacobian, yang berisi turunan parsial dari waktu tempuh dari seluruh pasangan gempa terhadap parameter hiposenter. Ukuran dari matriks Jacobian ini yaitu  $M \times 4N$ , dengan  $M$  adalah jumlah dari observasi *double difference* dan  $N$  adalah banyaknya gempa yang terekam, sedangkan 4 merupakan banyaknya parameter hiposenter  $(x_o, y_o, z_o, t_o)$ . Matriks  $\Delta d$  berisi nilai residual waktu tempuh seluruh pasangan gempa, dan ukurannya yaitu  $M \times 1$ .  $\Delta m$  adalah matriks yang berisi vektor perubahan posisi relatif pasangan hiposenter terhadap posisi hiposenter awal pada satu *cluster*, berukuran  $4N \times 1$ . Setiap persamaan akan diberi pembobotan  $W$ .  $W$  merupakan matriks diagonal yang berperan sebagai pembobotan apriori berdasarkan kualitas dari *picking* tiap *event* dengan nilai 0 atau 1.

Uraian di atas merupakan langkah-langkah dalam penentuan hiposenter menggunakan metode *Double Difference* dalam satu iterasi. Namun, jika penentuan hiposenter yang telah dilakukan menghasilkan nilai residual yang masih bernilai besar maka perlu dilakukan iterasi kembali, sehingga akan diperoleh nilai residual minimum yang lebih kecil dan mendekati nol yang mengindikasikan bahwa perbaikan posisi hiposenter telah tercapai.

## **2.5 Tomografi Seismik**

### **2.5.1 Pengertian Tomografi Seismik**

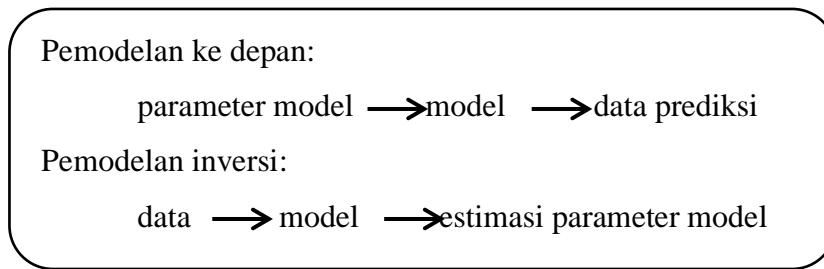
Menurut Iyer dan Hirahara (1993, hal. 2) dalam bukunya “*Seismic Tomography: Theory and Practice*”, sebagian besar gambar dari tomografi seismik didasarkan pada distribusi kecepatan gelombang gempa yang ditentukan dengan data waktu tiba gelombang gempa. Definisi tomografi seismik tersebut dilengkapi oleh Tien-when dan Philip (1994, hal. 1) sebagai teknik pencitraan yang menghasilkan gambar dari suatu objek dengan memanfaatkan respon objek terhadap energi eksternal yang bersifat non-destruktif. Energi eksternal yang dimaksud bisa berupa energi buatan ataupun energi alami berupa gempa bumi.

Dari kedua pendapat di atas, maka dapat didefinisikan bahwa tomografi seismik adalah salah satu metode geofisika dalam teknik pencitraan yang menghasilkan gambar dari suatu objek (dalam hal ini yaitu bumi) berdasarkan waktu tiba gelombang seismik yang terjadi di seluruh dunia.

### **2.5.2 Jenis Pemodelan Tomografi Seismik**

Tomografi seismik terbagi dalam dua jenis pemodelan, yaitu pemodelan ke depan (*forward modelling*) dan pemodelan inversi (*inverse modelling*). Pemodelan ke depan didefinisikan sebagai proses untuk memprediksi hasil pengukuran (memprediksi data) menggunakan persamaan matematis yang diturunkan dari beberapa konsep umum atau model yang relevan terhadap fenomena yang ditinjau (Menke, 1984, hal. 2). Grandis (2009) menambahkan jika parameter model bawah permukaan tertentu telah diketahui, maka kalkulasi data prediksi akan teramati di permukaan bumi. Dengan demikian, model tersebut dapat dianggap mewakili kondisi bawah permukaan di tempat pengukuran data.

Sedangkan pemodelan inversi dapat dikatakan sebagai kebalikan dari pemodelan ke depan. Menke (1984, hal. 2) menjelaskan pemodelan inversi merupakan teknik untuk mendapatkan informasi yang berguna mengenai suatu fenomena fisika berdasarkan pengamatan. Pemodelan inversi dimulai dengan data dan sebuah prinsip umum atau model, kemudian dua hal tersebut digunakan untuk memperkirakan parameter model. Secara sederhana, kedua pemodelan di atas dapat digambarkan dengan skema berikut ini.



Gambar 2.7 Perbedaan pemodelan ke depan (*forward modelling*) dan pemodelan inversi (*inverse modelling*) (Menke, 1984)

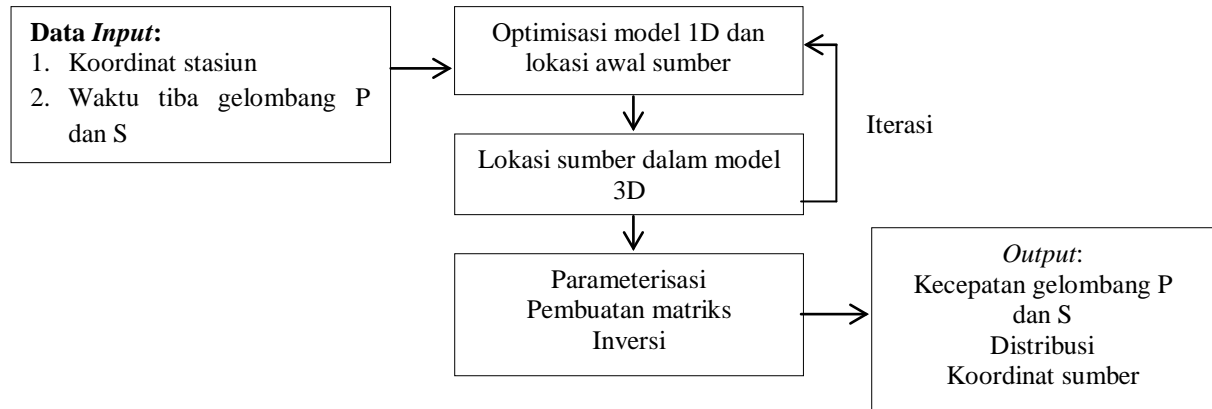
Pada penelitian ini, tomografi seismik yang digunakan yaitu tomografi seismik dengan pemodelan inversi karena parameter model telah didapat secara langsung dari data seismik. Pemodelan inversi juga dipilih dengan beberapa pertimbangan diantaranya pemodelan ke depan membutuhkan waktu yang relatif lebih lama jika dibandingkan dengan pemodelan inversi karena sifatnya yang tidak otomatis. Selain itu pemodelan inversi bersifat lebih obyektif karena parameter model telah didapat secara langsung dari data seismik.

### 2.5.3 Metode Tomografi Seismik

Prinsip dasar tomografi seismik yaitu mencitrakan bawah permukaan daerah penelitian dalam domain kecepatan. Untuk memudahkan kalkulasi, kecepatan gelombang lokal diganti dengan kelambanan lokal pada tahap inversi. Hal ini dikarenakan ketika berada domain kelambanan (*slowness*) persamaan inversi menjadi linear. Proses inversi tomografi pada penelitian ini dibantu oleh sebuah *software* yang bernama *Local Tomography Software* (LOTOS) versi 12. LOTOS 12 adalah sebuah *software* yang dapat digunakan untuk mencitrakan tomografi suatu wilayah berdasarkan gelombang-gelombang seismik yang terdapat di wilayah tersebut. LOTOS didesain untuk menginversi struktur kecepatan gelombang P dan S yang simultan serta koordinat sumber gempa untuk mendapatkan pencitraan dari kondisi bawah permukaan daerah gempa. Algoritma LOTOS juga dapat dengan mudah diaplikasikan untuk berbagai set data tanpa pemrosesan parameter yang rumit (Koulakov, 2009).



Secara umum, prinsip kerja LOTOS dapat disajikan dalam diagram alur berikut ini:



Gambar 2.8 Prinsip kerja LOTOS (Koulakov, 2009)

LOTOS 12 ini menggunakan *Windows* sebagai sistem operasinya. Perbedaan utama jika dibandingkan dengan versi sebelumnya, LOTOS 07 dan LOTOS 09 yaitu (Koulakov, 2009, hal. 4):

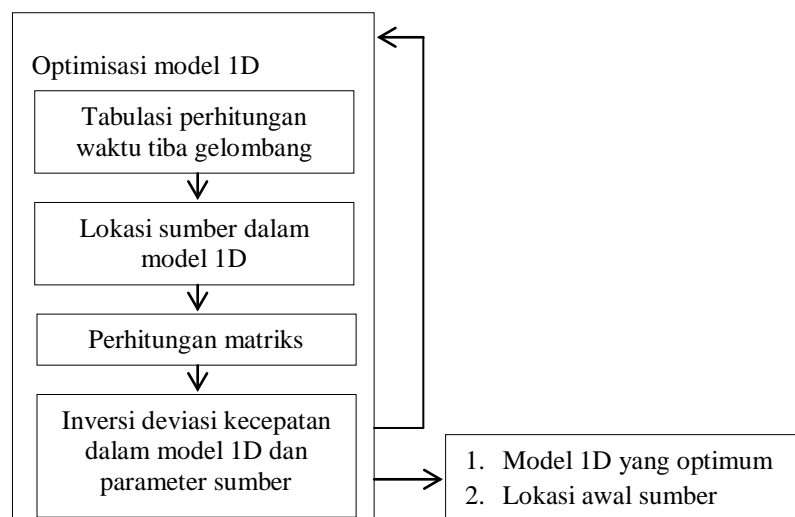
1. Selain inversi untuk  $V_p$  dan  $V_s$ , LOTOS 12 juga memiliki kemampuan untuk menginversi  $V_p$ - $V_p/V_s$ .
2. Hasil dalam bidang horisontal dapat disajikan dalam tipe PNG *bitmap* tanpa menggunakan *software* grafis apapun.
3. Struktur *file* dan program menjadi lebih sederhana dan sesuai.
4. Disediakan beberapa contoh berbeda yang dapat digunakan untuk merekonstruksi model baru.
5. Disediakan beberapa panduan yang sangat membantu dalam penggunaan *software* ini.
6. Disediakan *tool* untuk simulasi data buatan yang dapat digunakan untuk merencanakan *network deploying* (penyebaran jaringan).
7. Sudah mencakup topografi pula, sumber dapat terletak di atas permukaan laut.
8. Disediakan lokasi sumber awal berdasarkan *straight line approximation* (perkiraan garis lurus), misalnya untuk kasus lokal.

Secara umum, algoritma LOTOS terdiri dari langkah-langkah berikut.

1. Optimisasi yang simultan untuk model kecepatan 1D terbaik dan lokasi awal sumber,
2. Lokasi sumber dalam model kecepatan 3D
3. Inversi yang simultan untuk parameter sumber dan model kecepatan menggunakan beberapa grid parameterisasi.

Secara lebih rinci, langkah-langkah tersebut diuraikan sebagai berikut.

### 1. Algoritma Optimisasi Kecepatan 1D dan Lokasi Awal Sumber



Gambar 2.9 Langkah utama optimisasi kecepatan 1D dan lokasi awal sumber

Gambar 2.9 merupakan langkah-langkah utama yang ditempuh dalam memperoleh model 1D yang optimum dan lokasi awal sumber. Langkah-langkah utama tersebut telah mencakup beberapa langkah berikut ini (Koulakov, 2009, hal. 8).

**Langkah 1.** Pemilihan data untuk optimisasi. Data yang terpilih adalah data yang terdistribusi secara merata pada kedalaman yang sama. Agar hal tersebut tercapai, maka dipilih data dengan jumlah stasiun pencatat terbanyak untuk tiap interval kedalaman.

**Langkah 2.** Kalkulasi waktu tiba gelombang dalam model 1D. Pada iterasi pertama, model ditetapkan secara manual dengan menggunakan informasi awal.

**Langkah 3.** Lokasi sumber dalam model 1D. Waktu tiba gelombang akan dihitung berdasarkan data yang telah didapat dari Langkah 1. Kalkulasi lokasi sumber ini juga didasarkan pada kalkulasi *goal function* (GF) yang menunjukkan probabilitas suatu titik sebagai lokasi sumber (Koulakov dan Sobolev, 2006). GF pada *software* LOTOS 12 ini adalah:

$$G = \frac{\sum_{i=1}^N A(\Delta t_1) B(\Delta d_1) C}{\sum_{i=1}^N B(\Delta d_1) C} \quad (2.9)$$

Dalam hal ini, N adalah jumlah total *event* yang terekam, sedangkan A adalah nilai residual

$$A(\Delta t_i) = \begin{cases} 1, & \text{jika } |\Delta t_i| / C_{PS} < \tau_1 \\ (\Delta t_i - \tau_2) / (\tau_1 - \tau_2), & \text{jika } \tau_1 < |\Delta t_i| / C_{PS} < \tau_2 \\ 0, & \text{jika } |\Delta t_i| / C_{PS} > \tau_2 \end{cases} \quad (2.10)$$

$\tau_1$  dan  $\tau_2$  adalah limit untuk nilai residual. Jika nilai residual tersebut kurang dari  $\tau_1$  GF menjadi 1, namun jika kurang dari  $\tau_1$  GF menjadi 0. Nilai  $\tau_1$  dan  $\tau_2$  ditentukan dari nilai prediksi dari anomali kecepatan. B adalah jarak kebergantungan seperti yang dituliskan pada Pers. (2.9).

$$B = \begin{cases} 1, & \text{jika } d_i < d_{min} \\ (d_{min}/d_i)^m, & \text{jika } d_i > d_{min} \end{cases} \quad (2.11)$$

dan C merupakan fase pembobotan. Bobot untuk fase gelombang P yaitu 1, untuk gelombang S lebih kecil dari P ( $W_s=1/P$ ). Sedangkan untuk gelombang dengan fase P dan S pada satu stasiun digunakan persamaan residual sebagai berikut:

$$\Delta t_i = (t_{obs}^s - t_{ref}^s) - (t_{obs}^p - t_{ref}^p) \quad (2.12)$$

Bobot untuk residual tersebut akan bertambah jika model kecepatan P dan S mempunyai korelasi yang lebih baik.

**Langkah 4.** Kalkulasi derivatif pertama dari matriks sepanjang *rays computed* dalam iterasi sebelumnya. Bentuk notasi matriksnya adalah sebagai berikut:

$$[A].[x]=[b] \quad (2.13)$$

$$\begin{bmatrix} \frac{dT_1}{dx} & \frac{dT_1}{dy} & \frac{dT_1}{dz} & \frac{dT_1}{dt} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \frac{dT_M}{dx} & \frac{dT_M}{dy} & \frac{dT_M}{dz} & \frac{dT_M}{dt} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} dx \\ dy \\ dz \\ dt \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_1 \\ r_2 \\ \dots \\ r_M \end{bmatrix} \quad (2.14)$$

Matriks [A] dikenal sebagai matriks kernel yang berisi derivatif pertama dari residual waktu tempuh setiap stasiun terhadap parameter hiposenter. Matriks ini berukuran  $n \times 4$  dimana  $n$  adalah jumlah stasiun pengamatan dan 4 adalah jumlah parameter hiposenter ( $x_0, y_0, z_0, t_0$ ). Matriks [b] adalah matriks yang berisi data pengamatan yang diperoleh dari residual waktu tiba gelombang gempa di stasiun pengamat gempa ( $t_{obs}$ ) dengan ukuran  $n \times 1$ . Sedangkan matriks [x] yang ingin diketahui berisi data posisi hiposenter ( $x, y, z$ ) dan data waktu terjadi gempa ( $t_0$ ) yang berukuran  $4 \times 1$ .

**Langkah 5.** Inversi matriks yang simultan untuk data P dan S menggunakan matriks pada Langkah 4. Matriks [A] pada Pers. (2.13) bukanlah matriks bujursangkar, sedangkan proses inversi tomografi hanya bisa dilakukan pada matriks yang bujursangkar. Oleh karena itu Matriks [A] dikalikan dengan transposnya.

$$[A^T A].[x] = [A^T b] \quad (2.15)$$

Selanjutnya dilakukan minimisasi norm sebagai berikut:

$$[x] = [(A^T A)^{-1}(A^T b)] \quad (2.16)$$

Matriks  $[A^T A]$  mendekati singular sehingga digunakan *gradient damping* dalam perkiraan solusi *least square linier* (LSQR). *Gradient damping* tersebut membiaskan solusi hasil inversi ke dalam suatu model yang *smooth*. Hal ini diharapkan dapat menghasilkan tomografi yang relatif *smooth* sehingga memudahkan interpretasi. Selanjutnya dilakukan pengulangan Langkah 1 sampai dengan Langkah 5 hingga diperoleh nilai RMS terkecil.

## 2. *Bending Algorithm* untuk Ray Tracing dalam Model Kecepatan 3D

Algoritma untuk *ray tracing* dalam LOTOS menggunakan prinsip Fermat. Algoritma ini disebut sebagai *bending tracing* (Um dkk., 1987). Hal yang penting dalam algoritma ini yaitu dapat digunakannya parameterisasi apapun dari distribusi kecepatan. Namun, yang diperlukan hanyalah mendefinisikan nilai

kecepatan yang unik dan positif pada titik manapun dari daerah penelitian. LOTOS versi terbaru yaitu LOTOS 12 telah mencakup banyak variasi pilihan dari definisi kecepatan.

### **3. Iterasi Inversi Tomografi**

#### ***a. Lokasi sumber dalam model kecepatan 3D***

Setelah model kecepatan 1D dan lokasi awal sumber diketahui dengan optimisasi model 1D, kemudian dilakukan relokasi sumber dengan ray tracing 3D (bending), maka langkah selanjutnya yaitu menggunakan metode gradien untuk mendapatkan lokasi sumber dalam model 3D (Koulakov dkk., 2006).

#### ***b. Parameterisasi titik gempa***

Metode parameterisasi menggunakan *nodes* dan algoritma telah dilakukan oleh Koulakov (2006). *Nodes* berada dalam tiap garis vertikal. *Nodes* dipasang sesuai dengan distribusi sinar. Jika tidak ada sinar maka tidak ada *nodes*. Jarak antara *nodes* diusahakan sekecil mungkin di dalam area dengan densitas sinar yang tinggi.

#### ***c. Kalkulasi matriks dan inversi $V_p$ - $V_s$***

Derivatif pertama dari matriks dihitung menggunakan *ray paths computed* setelah lokasi sumber telah dalam model 3D. Tiap elemen matriks,  $A_{ij} = \partial t_i / \partial v_j$ , sebanding dengan deviasi waktu sepanjang sinar ke- $i$  dalam *node* ke- $j$ . Inversi untuk matriks secara keseluruhan akan didapatkan dengan menggunakan iterasi LSQR (Paige, dkk., 1982; Van der Sluis, dkk., 1987).

#### ***d. Siklus iterasi***

Siklus iterasi dimulai dari langkah menentukan lokasi sumber, kalkulasi matriks, dan inversi. Iterasi dapat dilakukan berulang agar mendapatkan hasil yang terbaik.

*(halaman ini sengaja dikosongkan)*

## **BAB III**

### **METODOLOGI PENELITIAN**

#### **3.1 Alat**

Alat yang digunakan dalam penelitian ini adalah berupa *software-software*. *Software* tersebut digunakan untuk mengolah data penelitian, antara lain *software* SeisGram2K60 untuk melakukan *picking* data guna mendapatkan waktu tiba dari gelombang P (Tp) dan gelombang S (Ts), *software* VELEST untuk mendapatkan model kecepatan bumi yang baru untuk wilayah Jepang, *software* HypoDD untuk merelokasi hiposenter, dan *software* LOTOS 12 untuk melakukan inversi tomografi.

#### **3.2 Data penelitian**

Dalam penelitian ini dibutuhkan data sebagai *input* untuk diolah dan dianalisis lebih lanjut. Data yang digunakan dalam penelitian ini adalah data sekunder yang *download* dari <http://www.fnet.bosai.go.jp>. Data yang digunakan dalam penelitian ini yaitu data seismik yang telah terekam di lebih kurang 84 stasiun pencatat gempa yang tersebar di seluruh wilayah Jepang, dalam rentang waktu satu tahun yaitu mulai tanggal 1 Januari 2010 sampai dengan 1 Januari 2011. Tercatat 69 *event* yang terekam oleh stasiun pencatat gempa yang tersebar di seluruh wilayah Jepang. Tiap *event* berhasil terekam oleh jumlah stasiun yang bervariasi mulai dari 4 sampai 17 stasiun. Sehingga dari 69 *event* tersebut, terdapat 1153 gelombang seismik yang dapat dianalisis.

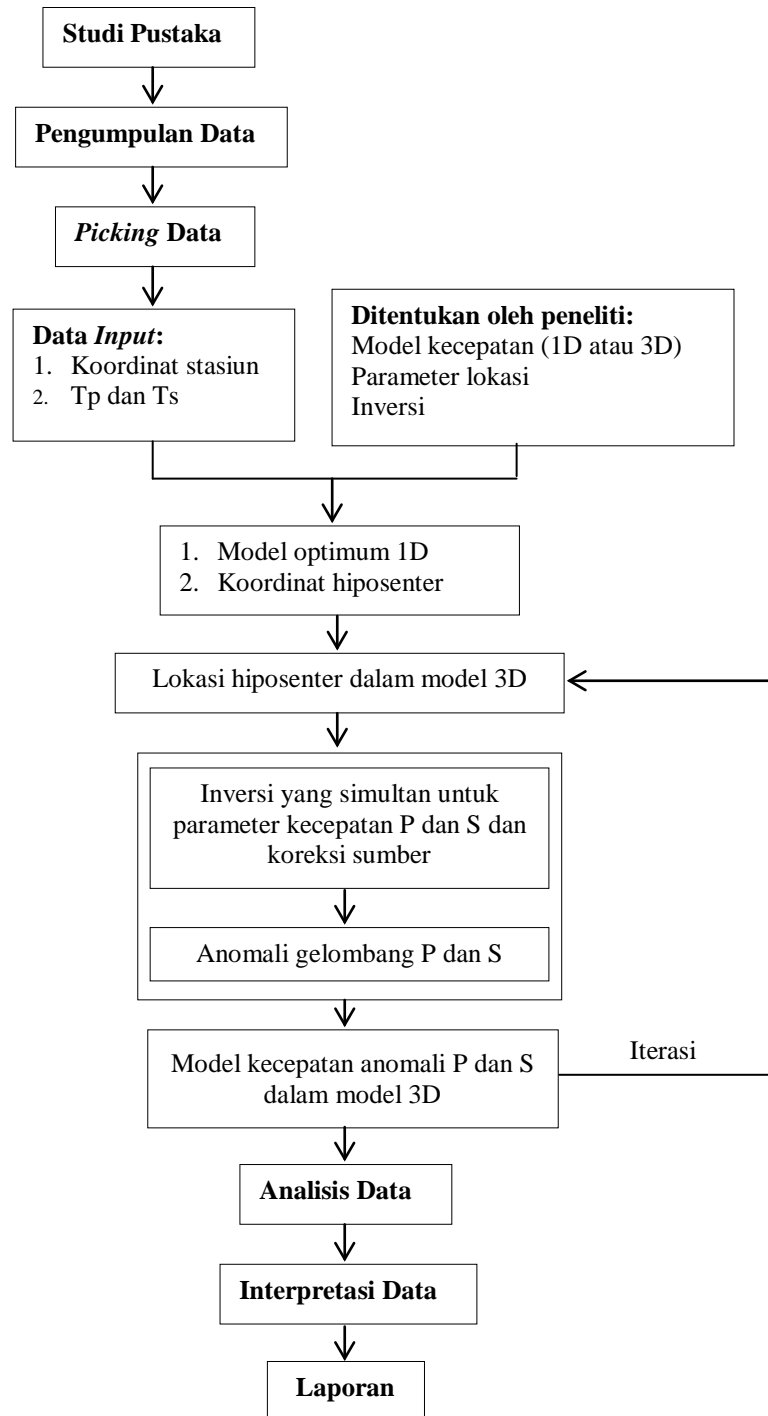
#### **3.3 Pemilihan data**

Tidak semua gempa yang diperoleh dalam rentang waktu antara 1 Januari 2010 sampai dengan 1 Januari 2011 digunakan dalam penelitian ini. Ada beberapa kriteria gelombang seismik yang akan diolah dan dianalisis, antara lain:

- a. Memiliki *magnitude* minimal 4,7 SR.
- b. Terekam di minimal 4 stasiun pencatat gempa yang tersebar di seluruh wilayah Jepang.

Data gempa yang masih berupa gelombang seismik tersebut kemudian *dipicking* untuk mendapatkan waktu tiba dari gelombang P dan S.

### 3.4 Rancangan Penelitian



Gambar 3.1 Diagram Alur Penelitian



### 3.5 Prosedur Penelitian

Berdasarkan diagram alur penelitian tersebut, maka prosedur penelitian adalah sebagai berikut.

#### 3.5.1 Studi Pustaka

Tahapan studi pustaka dilakukan untuk mengetahui beberapa teori pendukung yang relevan serta penelitian-penelitian yang telah dilakukan sebelumnya di lokasi yang sama.

#### 3.5.2 Picking Data

*Picking* data dilakukan untuk mendapatkan waktu tiba gelombang P ( $T_p$ ) dan gelombang S ( $T_s$ ). Dalam penelitian ini, penulis menggunakan *software* SeisGram2K60 untuk melakukan *picking*. Dalam hal ini sebenarnya *software* SeisGram2K60 dapat melakukan *autopicking*, namun seringkali hasil yang didapatkan tidak terlalu akurat. Oleh karena itu, penulis melakukan *manual picking* terhadap 1153 gelombang seismik. Pada *software* SeisGram2K60 dilakukan *picking* gelombang P pada komponen vertikal (BHZ), dan gelombang S pada komponen horizontal *northing* (BHN) atau *easting* (BHE).

#### 3.5.3 Pembaharuan Model Kecepatan 1D

Pembaharuan model kecepatan 1D dilakukan dengan bantuan *software* VELEST. *Software* VELEST memerlukan beberapa *file* sebagai *input*. Ada 4 jenis *file input*, antara lain \*.*cmn* yang berisi parameter kontrol, \*.*sta* yang berisi informasi mengenai stasiun-stasiun perekam gempa, \*.*mod* yang berisi model kecepatan awal, dan \*.*cnv* yang berisi data gempa lokal. Sedangkan *output* yang dihasilkan terdapat pada *file* \*.*out* yang berisi model kecepatan bumi yang baru.

#### 3.5.4 Persiapan Penentuan Hiposenter

Penentuan hiposenter dilakukan dengan bantuan *software* HypoDD. Pada *software* ini terdapat dua jenis *file input*, yaitu *phase.dat* dan *stat.dat*. *File* *phase.dat* merupakan *file input* yang berisi data gempa berupa origin time, *latitude*, *longitude*, *depth*, dan *magnitude*. Sedangkan *stat.dat* berisi informasi mengenai stasiun perekam gempa meliputi nama stasiun, *latitude*, dan *longitude* stasiun.

### **3.5.5 Persiapan *File Data Input***

Pada tahapan ini, disiapkan *file* data yang nantinya akan dijadikan *input* pada *software* LOTOS 12. Pada *software* LOTOS 12 terdapat *file inidata* yang di dalamnya berisi identitas *file rays* dan *stat\_ft*. Pada *file rays* berisi hiposenter *event* beserta waktu tempuh dari setiap stasiun. Seluruh identitas tersebut termuat dalam satu *file* agar dapat diolah secara simultan oleh *software* LOTOS 12. Sedangkan pada *file stat\_ft* berisi identitas stasiun berupa *latitude*, *longitude*, dan kedalamannya.

### **3.5.6 Penentuan Parameter Inversi Tomografi**

Tahapan penentuan parameter berupa model kecepatan, parameter lokasi, dan inversi dilakukan oleh peneliti. Tahapan ini diperlukan dalam proses pengolahan data.

### **3.5.7 Penentuan Iterasi dan *Output Display***

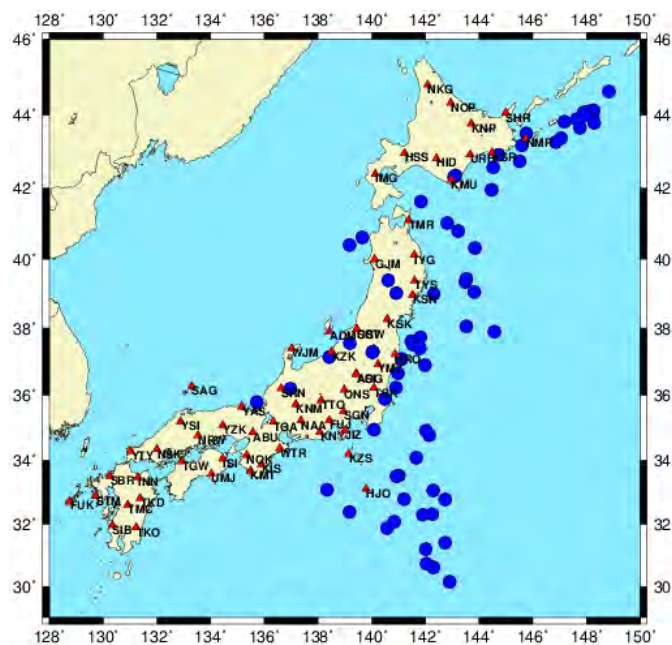
Pada tahapan ini, dilakukan penentuan jumlah iterasi, dan *output display* berupa *setver.dat*, *sethor.dat*, *config.dat* dan *all\_areas.dat*.

## BAB IV

### HASIL DAN PEMBAHASAN

#### 4.1 Pengumpulan dan Persiapan Data

Data yang digunakan dalam penelitian ini adalah data sekunder yang *didownload* dari <http://www.fnet.bosai.go.jp>. Rentang tempat dan waktu dalam pengumpulan data gempa tersebut yaitu semua gempa yang terletak pada 30°LU-46°LU dan 128°BT-149°BT dan terjadi antara tanggal 1 Januari 2010 sampai dengan 1 Januari 2011. Kemudian data gempa dipilih kembali berdasarkan *magnitude* dan jumlah stasiun yang mampu merekamnya. Data yang dipilih hanyalah yang memiliki *magnitude* minimal 4,7 SR dan terekam di minimal 4 stasiun pencatat gempa yang tersebar di seluruh wilayah Jepang. Berdasarkan kriteria tersebut terpilih 69 *event* dan 1153 gelombang seismik yang terekam pada 62 stasiun dengan sebaran seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4.1.

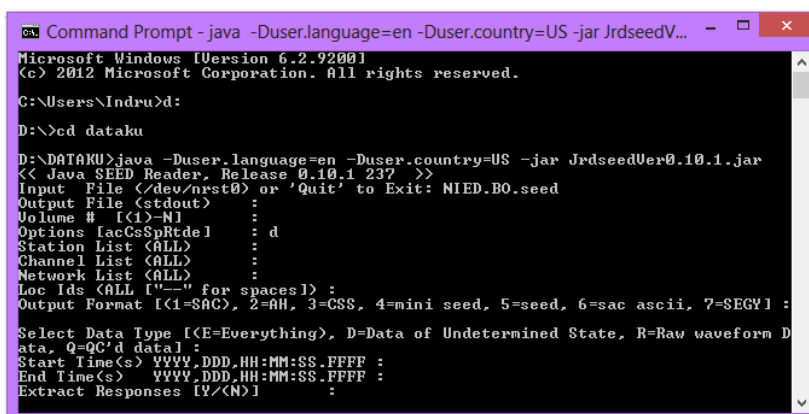


Gambar 4.1 Peta Persebaran Gempa dan Stasiun

Berdasarkan Gambar 4.1 dapat dilihat bahwa lingkaran warna biru merupakan posisi gempa sedangkan segitiga warna merah merupakan stasiun perekam gempa yang tersebar di seluruh wilayah Jepang. Sumbu X dari gambar

adalah batas *longitude* dalam satuan derajat dan sumbu Y adalah batas *latitude* dalam satuan derajat pula.

Format data awal yang didapat dari <http://www.fnet.bosai.go.jp> berupa \*seed, sedangkan data yang akan diproses haruslah berformat \*sac. Oleh karena itu dilakukan proses ekstraksi terlebih dahulu. Proses ekstraksi dilakukan dengan menggunakan perangkat lunak JrdseedVer0.10.1. Perangkat tersebut dibuka pada terminal dan diberikan perintah “java -Duser.language=en -Duser.country=US -jar JrdseedVer0.10.1.jar”. Memasukkan nama file yang akan diekstrak, kemudian mengetikkan “d” pada pilihan “Option” (Gambar 4.2) hingga data terekstrak dengan sempurna. Langkah yang sama dilakukan pula pada data-data gempa yang lainnya.



```
Microsoft Windows [Version 6.2.9200]
(c) 2012 Microsoft Corporation. All rights reserved.

C:\Users\Indru>cd D:\DATAKU
D:\DATAKU>java -Duser.language=en -Duser.country=US -jar JrdseedVer0.10.1.jar
<< Java SEED Reader, Release 0.10.1 237 >>
Input File </dev/nrst0> or 'Quit' to Exit: NIED.BO.seed
Output File <stdout> :
Volume # [(1)-N] :
Options [acCsSpRtde] : d
Station List <ALL> :
Channel List <ALL> :
Network List <ALL> :
Loc Ids <ALL ["-" for spaces]> :
Output Format [(1)=SAC, 2=AH, 3=CSS, 4=mini seed, 5=seed, 6=sac ascii, 7=SEGY] :
Select Data Type [(E=Everything), D=Data of Undetermined State, R=Raw waveform D
ata, Q=QC'd data] :
Start Time(s) YYYY.DDD.HH:MM:SS.FFFF :
End Time(s) YYYY.DDD.HH:MM:SS.FFFF :
Extract Responses [Y/(N)] :
```

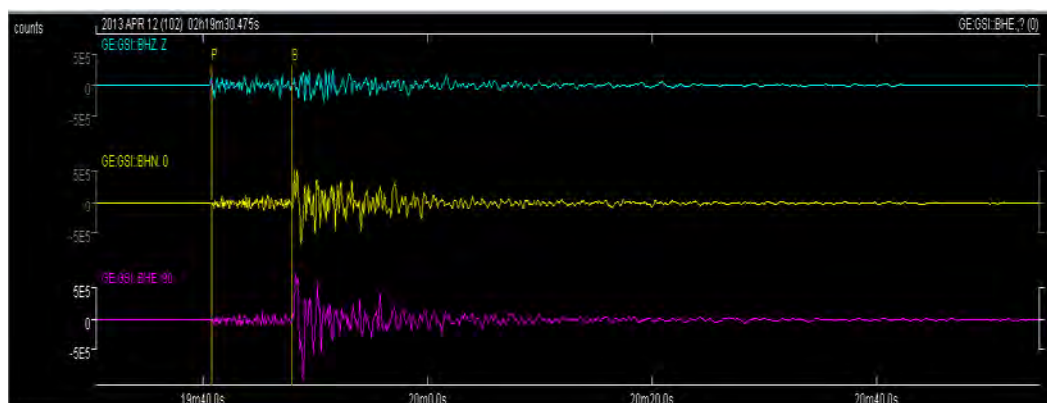
Gambar 4.2 Ekstraksi menggunakan JrdseedVer0.10.1

Data hasil ekstrak memiliki nama yang berisi informasi tentang data gempa itu sendiri. Misalnya “2010.006.14.20.0418.IA.ADM..BHZ.D”. Jika ditulis secara berurutan, maka format nama tersebut menyimpan informasi sebagai berikut: tahun, *Julian day* (hari ke- dalam setahun), jam, menit, detik, stasiun jaringan, nama stasiun jaringan, dan komponen kanal. Selanjutnya data hasil ekstrak tersebut *dipicking* untuk menentukan waktu tempuh gelombangnya.

## 4.2 Picking Data

Proses *picking* dilakukan dengan menggunakan *software* SeisGram2K60. *Picking* dilakukan secara manual terhadap 1153 gelombang seismik yang terpilih.

Setiap gelombang seismik memiliki tiga komponen yang berbeda seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4.3.



Gambar 4.3 Proses *picking* data menggunakan SeisGram2K60

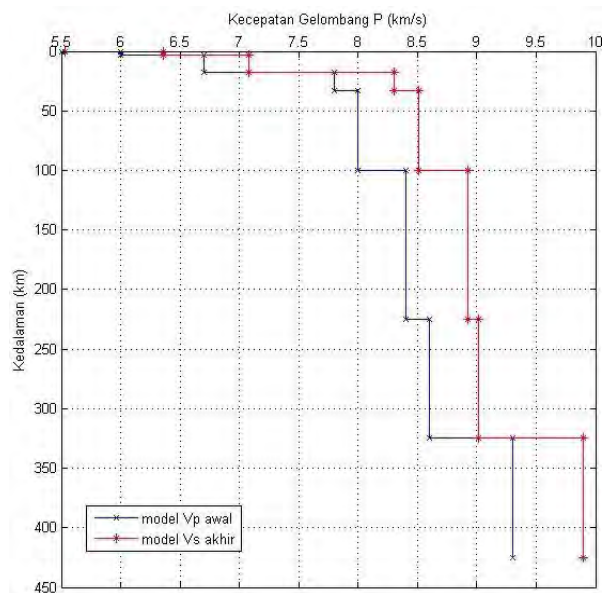
Komponen vertikal (BHZ) lebih diutamakan untuk *picking* gelombang P yaitu gelombang yang pertama kali datang, sedangkan komponen horizontal *northing* (BHN) atau *easting* (BHE) untuk *picking* gelombang S, gelombang yang datang setelah gelombang P. Pada umumnya, gelombang P lebih mudah dikenali daripada gelombang S, begitu pula dengan penelitian ini. Sehingga dari 1153 gelombang seismik, terdapat 579 gelombang P dan 574 gelombang S yang berhasil teramati. Hasil dari *picking* data ini yaitu didapatkannya waktu tiba gelombang P ( $T_p$ ) dan gelombang S ( $T_s$ ) yang selanjutnya akan menjadi parameter awal pada proses pembaharuan model kecepatan bumi, relokasi hiposenter, dan inversi tomografi.

#### 4.3 Pembaharuan Model Kecepatan 1D

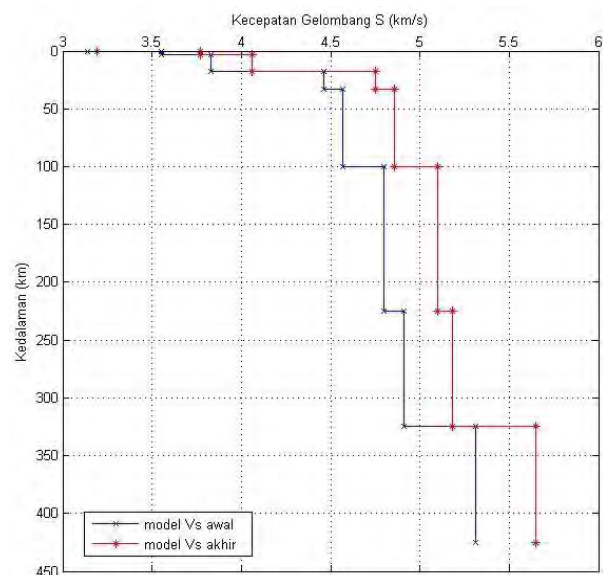
Pembaharuan model kecepatan 1D dilakukan dengan bantuan *software* VELEST. *Software* VELEST memerlukan beberapa *file* sebagai *input*. Ada 4 jenis *file* input, antara lain \*.*cmn* yang berisi parameter kontrol, \*.*sta* yang berisi informasi mengenai stasiun-stasiun perekam gempa, \*.*mod* yang berisi model kecepatan awal, dan \*.*cnv* yang berisi data gempa lokal. Setelah memasukkan semua data yang diperlukan, maka proses *running* bisa dimulai. *Running* dimulai dengan memanggil aplikasi VELEST dari terminal menggunakan perintah tertentu. Tidak lama kemudian *file* output dihasilkan. *File* output yang dihasilkan berupa 3 jenis *file* yang berbeda, antara lain *velout.mod* yang berisi model

kecepatan akhir, *mod11area7.sta* berisi koreksi stasiun, dan *VELMOD11area7.out* yang berisi relokasi hiposenter dan waktu asal terjadinya gempa.

Dalam penelitian ini output yang akan digunakan hanyalah *velout.mod* yang berisi model kecepatan akhir. Perbedaan antara model kecepatan awal dan model kecepatan akhir dapat ditunjukkan dalam grafik variasi kecepatan gelombang P terhadap kedalaman dan variasi kecepatan gelombang S terhadap kedalaman berikut ini:



Gambar 4.4 Variasi Kecepatan Gelombang P terhadap Kedalaman



Gambar 4.5 Variasi Kecepatan Gelombang S terhadap Kedalaman

Secara lebih rinci perbedaan model kecepatan awal dan model kecepatan akhir ditunjukkan pada Tabel 4.1.

Tabel 4.1 Hasil Pembaharuan Model Kecepatan Bumi untuk Wilayah Jepang

Kedalaman (km)	Model Kecepatan Awal		Model Kecepatan Akhir	
	Vp (km/s)	Vs (km/s)	Vp (km/s)	Vs (km/s)
0	5,50	3,14	5,53	3,19
3	6,00	3,55	6,36	3,77
18	6,70	3,83	7,08	4,06
33	7,80	4,46	8,30	4,75
100	8,00	4,57	8,51	4,86
225	8,40	4,80	8,92	5,10
325	8,60	4,91	9,01	5,18
425	9,30	5,31	9,90	5,65

#### 4.4 Hasil Relokasi Hiposenter

Proses yang akan dilakukan setelah *picking* gelombang yaitu relokasi hiposenter. Relokasi hiposenter ini menggunakan data waktu tiba gelombang yang telah didapat dari proses *picking*. Relokasi hiposenter dilakukan dengan bantuan *software* HypoDD. HypoDD merupakan *software* yang dioperasikan pada sistem operasi Linux. Namun pada penelitian ini, HypoDD dioperasikan dengan sistem operasi Windows dengan menggunakan *software* cygwin. Cygwin merupakan sekumpulan *tools* Linux yang bisa dipakai di Windows, sehingga kita tetap dapat menjalankan perintah-perintah khas Linux ke dalam sistem operasi Windows melalui terminal cygwin.

Sebelum mulai memasukkan data input ke dalam *software*, langkah yang harus dilakukan yaitu meng-*compile* program HypoDD terlebih dahulu. Proses *compile* program HypoDD ini menggunakan beberapa perintah Linux yang dioperasikan melalui terminal cygwin. Jika seluruh komponen program telah ter-*compile* dengan sempurna maka input data dapat dilakukan.

Ada dua tahapan untuk mengoperasikan program HypoDD, yaitu yang pertama memasukkan data *travel time* ke dalam folder “ph2dt”. *Input* data yang diperlukan pada tahapan ini adalah “phase.dat” dan “station.dat”. “Phase.dat” ini berisi data kejadian gempa yang meliputi waktu terjadinya gempa (tahun, bulan, tanggal, jam, menit, detik), *latitude*, *longitude*, kedalaman, dan *magnitude* gempa. Selain itu, diperlukan pula data waktu tempuh gelombang gempa yang

terekam pada setiap stasiun. Sedangkan input “station.dat” berisi data stasiun perekam gempa yang meliputi nama stasiun, *latitude*, dan *longitude* nya.

*Output* dari tahapan ini yaitu berupa “dt.ct” yang berisi data waktu tempuh absolut dari pasangan gempa bumi, dan “event.dat” yang berisi lokasi awal hiposenter. Tahapan yang kedua yaitu memasukkan data ke dalam folder “hypoDD”. *Input* dari tahapan ini tidak lain adalah *output* dari tahapan pertama, disertakan pula “station.dat”. Kemudian *running* dimulai melalui terminal cygwin, hingga akhirnya menghasilkan beberapa output yang dapat digunakan dalam proses selanjutnya. Output tersebut antara lain “hypoDD.loc”, “hypoDD.reloc”, “hypoDD.sta”, “hypoDD.res”, dan “hypoDD.src”. “HypoDD.loc” yang berisi hiposenter awal. “HypoDD.reloc” merupakan hasil relokasi hiposenter. “HypoDD.sta” yaitu residual stasiun, “hypoDD.res” yaitu residual data, dan “hypoDD.src” yang merupakan sudut *take off*. Hasil output yang akan digunakan untuk proses inversi tomografi adalah hasil relokasi hiposenter yang terdapat pada file “hypoDD.reloc”. Relokasi yang dihasilkan meliputi data *latitude*, *longitude* dan kedalaman yang mengalami perubahan dari data awal seperti yang ditunjukkan pada Tabel 4.2.

Tabel 4.2 Hasil Relokasi Hiposenter

No.	Event	Lat (°)		Long (°)		Depth	
		Katalog	HypoDD	Katalog	HypoDD	Katalog	HypoDD
1	2010/01/06,14:20:04,18	37,8960	37,8860	144,5643	144,5687	45,00	53,138
2	2010/01/14,18:46:25,57	42,3527	42,3566	143,1180	143,1156	51,49	46,611
3	2010/01/15,15:44:45.,80	43,3772	43,3921	147,0550	147,0122	37,74	32,775
4	2010/01/17,06:04:38,53	38,0518	38,0517	143,5272	143,5298	41,00	44,159
5	2010/02/16,01:57:14,20	40,3193	40,3230	143,8433	143,8474	23,00	23,115
6	2010/02/16,19:59:30,51	34,9508	34,9615	140,0872	140,0626	82,66	79,205
7	2010/02/20,11:47:56,16	43,9685	43,9576	148,2317	148,2450	0,00	0,023
8	2010/02/28,08:17:41,45	34,7762	34,7729	142,1430	142,1430	42,00	45,402
9	2010/02/28,22:07:46,69	39,3908	39,3859	140,6098	140,6125	118,36	118,218
10	2010/03/06,13:31:11,06	43,8840	43,8721	147,6177	147,6066	6,00	7,026
11	2010/03/12,17:32:06,40	34,9110	34,9148	142,0265	142,0246	51,65	48,595
12	2010/03/13,12:46:26,75	37,6142	37,6152	141,4717	141,4732	77,70	78,147
13	2010/03/14,07:04:13,08	33,5298	33,5354	141,0095	141,0036	56,00	53,484
14	2010/03/14,08:08:04,18	37,7242	37,7300	141,8180	141,8259	39,75	42,801



Lanjutan

No.	Event	Lat (°)		Long (°)		Depth	
		Katalog	HypoDD	Katalog	HypoDD	Katalog	HypoDD
15	2010/03/27,20:02:34,42	33,5070	33,5077	140,9235	140,9197	50,00	47,021
16	2010/04/05,09:36:33,92	36,9058	36,8951	141,9818	141,9785	44,79	46,621
17	2010/04/08,18:41:49,39	42,9168	42,9166	144,7076	144,7071	57,32	53,940
18	2010/04/14,08:16:22,84	31,8795	31,8864	140,5683	140,5549	71,89	68,478
19	2010/04/22,19:58:36,74	43,7883	43,7848	148,2795	148,2660	0,00	1,947
20	2010/04/23,01:59:13,78	32,3143	32,3141	142,2645	142,2653	17,00	16,955
21	2010/05/01,09:20:37,29	37,5592	37,5633	139,1912	139,1766	9,26	9,186
22	2010/05/12,18:55:31,94	32,7895	32,7899	141,2052	141,2047	46,00	45,888
23	2010/05/18,08:33:44,85	43,6500	43,6201	147,7653	147,7655	0,00	0,016
24	2010/05/31,16:34:56,75	30,6190	30,6214	142,3000	142,2958	45,00	17,968
25	2010/06/01,04:49:22,06	37,5122	37,5159	141,5387	141,5282	45,44	38,047
26	2010/06/05,05:22:03,29	43,2702	43,2966	146,8683	146,8413	62,32	39,302
27	2010/06/05,16:36:37,60	33,0922	33,0922	138,3395	138,3394	340,39	340,389
28	2010/06/10,00:03:56,71	33,0622	33,0652	142,2865	142,2843	0,00	1,168
29	2010/06/13,03:32:57,02	37,3960	37,3979	141,7957	141,8054	40,30	44,455
30	2010/06/27,21:03:25,38	41,6260	41,6268	141,8332	141,8415	57,11	52,502
31	2010/06/28,12:07:23,67	30,7443	30,7438	142,0380	142,0405	18,00	17,918
32	2010/07/01,14:48:12,75	32,0768	32,0744	140,8420	140,8450	5,00	4,709
33	2010/07/02,01:19:46,18	44,6288	44,5668	148,8292	148,8049	30,00	32,879
34	2010/07/03,19:33:12,17	39,0247	39,0324	140,9128	140,8993	7,12	7,297
35	2010/07/05,00:53:14,49	43,8185	43,8016	147,1798	147,1702	30,00	31,187
36	2010/07/05,15:48:36,02	35,7890	35,7890	135,7212	135,7212	346,18	346,182
37	2010/07/08,12:23:27,20	42,5733	42,5727	144,5287	144,5142	58,98	56,972
38	2010/07/20,03:25:43,44	44,1272	44,1388	148,2612	148,2649	0,00	0,767
39	2010/07/22,21:06:31,49	35,8787	35,8875	140,4855	140,4803	35,02	30,553
40	2010/07/26,23:31:03,16	38,9972	38,9930	142,3078	142,3008	25,37	25,889
41	2010/07/31,03:52:55,92	32,3885	32,3885	139,1715	139,1715	251,49	251,491
42	2010/08/04,20:09:36,90	44,0927	44,1277	148,0647	148,0787	0,00	0,082
43	2010/08/10,05:50:34,64	39,3487	39,3452	143,4947	143,5027	30,00	28,987
44	2010/08/10,16:00:39,28	39,4305	39,4273	143,5243	143,5159	40,00	30,732
45	2010/08/13,20:19:44,61	32,7803	32,7790	142,7385	142,7393	30,00	29,869
46	2010/08/26,15:08:04,23	36,1918	36,1918	136,9672	136,9671	285,77	285,768
47	2010/08/31,02:30:31,56	40,4028	40,4030	139,1747	139,1745	33,48	35,165
48	2010/09/03,21:15:29,38	42,7432	42,7516	145,5135	145,5245	61,25	62,794
49	2010/09/13,23:05:12,56	32,3033	32,2977	141,9037	141,9120	0,00	0,555
50	2010/09/17,06:47:30,90	31,4083	31,4110	142,7338	142,7318	57,00	55,242
51	2010/09/17,17:58:36,63	30,1613	30,1558	142,8980	142,9109	50,00	64,060
52	2010/09/21,20:15:10,93	40,6197	40,6195	139,6517	139,6519	192,35	192,332
53	2010/09/27,16:13:38,72	43,5008	43,4962	145,7598	145,7508	98,79	98,092

Lanjutan

No.	Event	Lat (°)		Long (°)		Depth	
		Katalog	HypoDD	Katalog	HypoDD	Katalog	HypoDD
54	2010/09/29,03:01:57,60	37,2985	37,2986	140,0453	140,0484	6,34	5,852
55	2010/09/29,07:59:55,98	37,2850	37,2816	140,0255	140,0252	7,62	6,264
56	2010/09/30,12:47:09,52	37,0835	37,0842	141,1223	141,1207	51,38	50,848
57	2010/10/03,00:26:52,83	37,1383	37,1382	138,4177	138,3984	22,36	24,841
58	2010/10/10,02:27:49,65	31,2035	31,1967	142,0160	142,0185	34,00	80,190
59	2010/10/14,09:41:34,28	44,0652	44,0809	147,8938	147,8949	0,00	0,934
60	2010/10/14,13:58:55,50	42,3128	42,3084	143,0695	143,0668	53,04	55,918
61	2010/11/14,06:10:27,08	34,0880	34,0896	141,6608	141,6616	40,57	40,722
62	2010/11/19,04:01:58,77	43,1740	43,1696	145,5967	145,6034	53,27	54,527
63	2010/11/24,11:09:10,71	36,2293	36,2151	140,9023	140,9175	47,13	51,111
64	2010/12/06,07:30:29,85	40,7992	40,8009	143,2183	143,2260	6,84	6,134
65	2010/12/07,02:27:13,52	43,9785	44,0149	147,9210	147,9253	0,00	0,757
66	2010/12/09,16:21:02,19	39,0518	39,0571	143,8228	143,8213	8,41	8,564
67	2010/12/15,05:43:46,42	41,9532	41,9445	144,4680	144,4799	34,76	47,625
68	2010/12/15,07:37:19,98	41,0297	41,0286	142,8092	142,8050	23,32	23,256
69	2010/12/31,23:01:02,17	36,6575	36,6617	140,9735	140,9612	49,15	44,773

Sedangkan nilai RMS dan perubahan origin time ditunjukkan pada Tabel

4.3 berikut:

Tabel 4.3 Perubahan *Origin Time* dan Nilai RMS

No.	<i>Origin Time</i>		Nilai RMS
	Katalog	HypoDD	
1	14:20:04,18	14:20:04,22	1,501
2	18:46:25,57	18:46:25,48	0,990
3	15:44:45,80	15:44:45,38	1,802
4	06:04:38,53	06:04:38,55	1,941
5	01:57:14,20	01:57:14,19	1,411
6	19:59:30,51	19:59:30,34	1,406
7	11:47:56,16	11:47:56,29	2,257
8	08:17:41,45	08:17:41,46	1,310
9	22:07:46,69	22:07:46,62	1,160
10	13:31:11,06	13:31:10,96	1,345
11	17:32:06,40	17:32:06,38	1,240
12	12:46:26,75	12:46:26,77	1,267
13	07:04:13,08	07:04:13,03	2,095
14	08:08:04,18	08:08:04,23	1,445
15	20:02:34,42	20:02:34,40	1,991

Lanjutan

No.	<i>Origin Time</i>		Nilai RMS
	Katalog	HypoDD	
16	09:36:33,92	09:36:33,94	2,002
17	18:41:49,39	18:41:49,28	1,067
18	08:16:22,84	08:16:22,76	2,232
19	19:58:36,74	19:58:36,60	1,800
20	01:59:13,78	01:59:13,78	1,639
21	09:20:37,29	09:20:37,10	1,302
22	18:55:31,94	18:55:31,94	1,716
23	08:33:44,85	08:33:44,98	1,762
24	16:34:56,75	16:34:56,72	2,535
25	04:49:22,06	04:49:21,97	1,513
26	05:22:03,29	05:22:03,02	2,167
27	16:36:37,60	16:36:37,60	0,714
28	00:03:56,71	00:03:56,69	1,583
29	03:32:57,02	03:32:57,06	1,916
30	21:03:25,38	21:03:25,20	1,274
31	12:07:23,67	12:07:23,68	2,276
32	14:48:12,75	14:48:12,78	2,103
33	01:19:46,18	01:19:45,97	1,797
34	19:33:12,17	19:33:12,12	1,317
35	00:53:14,49	00:53:14,40	1,979
36	15:48:36,02	15:48:36,02	1,596
37	12:23:27,20	12:23:27,13	0,978
38	03:25:43,44	03:25:43,47	1,950
39	21:06:31,49	21:06:31,44	1,198
40	23:31:03,16	23:31:03,12	1,566
41	03:52:55,92	03:52:55,92	0,714
42	20:09:36,90	20:09:37,02	1,618
43	05:50:34,64	05:50:34,72	1,561
44	16:00:39,28	16:00:39,22	1,617
45	20:19:44,61	20:19:44,60	1,267
46	15:08:04,23	15:08:04,23	1,596
47	02:30:31,56	02:30:31,56	1,858
48	21:15:29,38	21:15:29,44	1,413
49	23:05:12,56	23:05:12,62	2,241
50	06:47:30,90	06:47:30,88	2,171
51	17:58:36,63	17:58:36,72	1,826
52	20:15:10,93	20:15:10,92	1,858
53	16:13:38,72	16:13:38,66	1,722
54	03:01:57,60	03:01:57,60	1,463

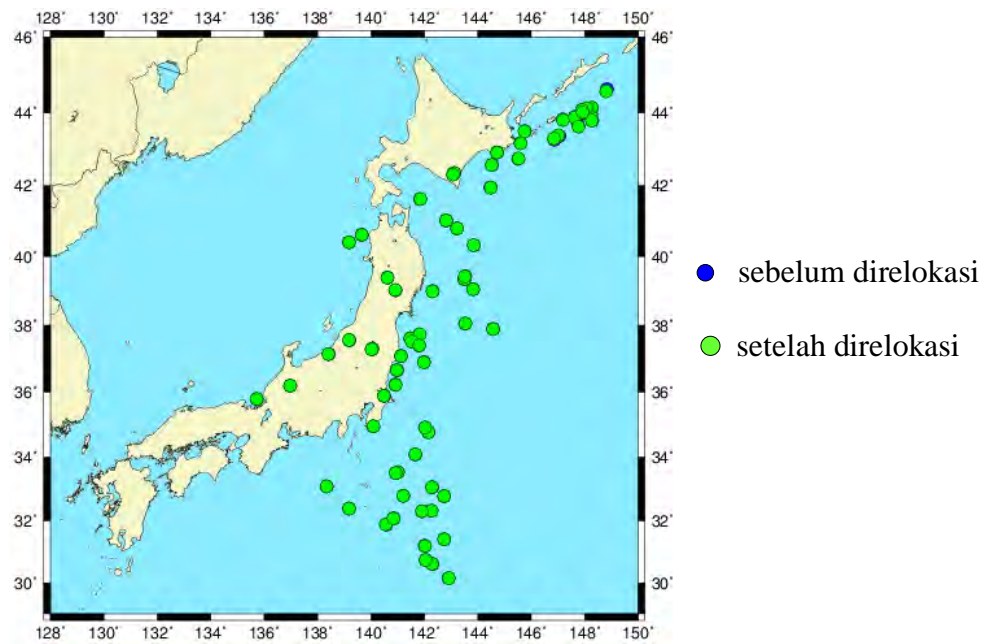
Lanjutan

No.	<i>Origin Time</i>		Nilai RMS
	Katalog	HypoDD	
55	07:59:55,98	07:59:56,10	2,069
56	12:47:09,52	12:47:09,50	1,419
57	00:26:52,83	00:26:52,65	1,407
58	02:27:49,65	02:27:49,71	2,725
59	09:41:34,28	09:41:34,29	1,485
60	13:58:55,50	13:58:55,56	1,181
61	06:10:27,08	06:10:27,08	1,597
62	04:01:58,77	04:01:58,82	1,763
63	11:09:10,71	11:09:10,85	1,859
64	07:30:29,85	07:30:29,92	1,388
65	02:27:13,52	02:27:13,55	1,601
66	16:21:02,19	16:21:02,17	1,743
67	05:43:46,42	05:43:46,53	1,307
68	07:37:19,98	07:37:19,99	1,529
69	23:01:02,17	23:01:02,06	1,322

Berdasarkan Tabel 4.2 terlihat bahwa mayoritas gempa bumi yang terekam termasuk dalam gempa dangkal. Terdapat 56 gempa dangkal dengan kedalaman maksimal 60 km, 11 gempa menengah dengan kedalaman antara 60 km sampai 300 km, dan 2 gempa dalam dengan kedalaman lebih dari 300 km. Selain itu dapat dilihat nilai RMS pada Tabel 4.3. Nilai RMS merupakan nilai keakuratan dari parameter model yang diperoleh. Model yang telah didapat pada penelitian ini memiliki rentang rms mulai 0,714 sampai 2,725. Besar kecilnya nilai RMS ditentukan oleh ketepatan tebakan awal yang diberikan.

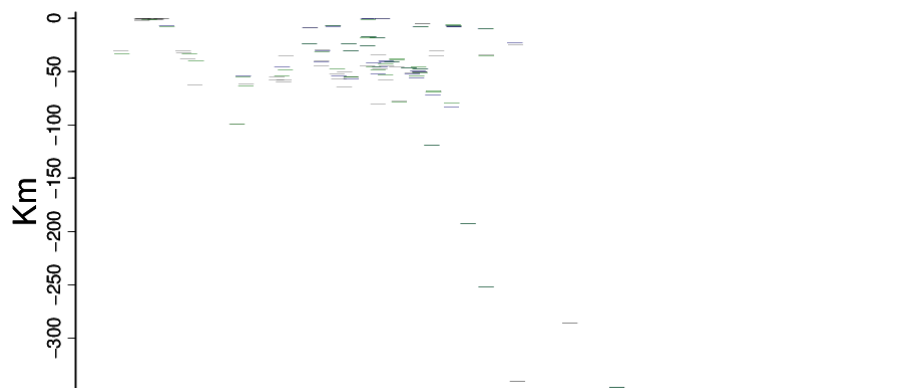
Data-data hasil dari relokasi hiposenter ini kemudian dikorelasikan kembali dengan data yang didapat dari katalog agar dapat dilakukan analisis yang nantinya akan dicapai kesimpulan posisi gempa yang lebih akurat sebagai pedoman untuk penentuan hiposenter gempa berikutnya.

Hasil relokasi hiposenter ditunjukkan dalam peta relokasi dengan menggunakan perangkat lunak *General Mapping Tool* (GMT) sebagai berikut:



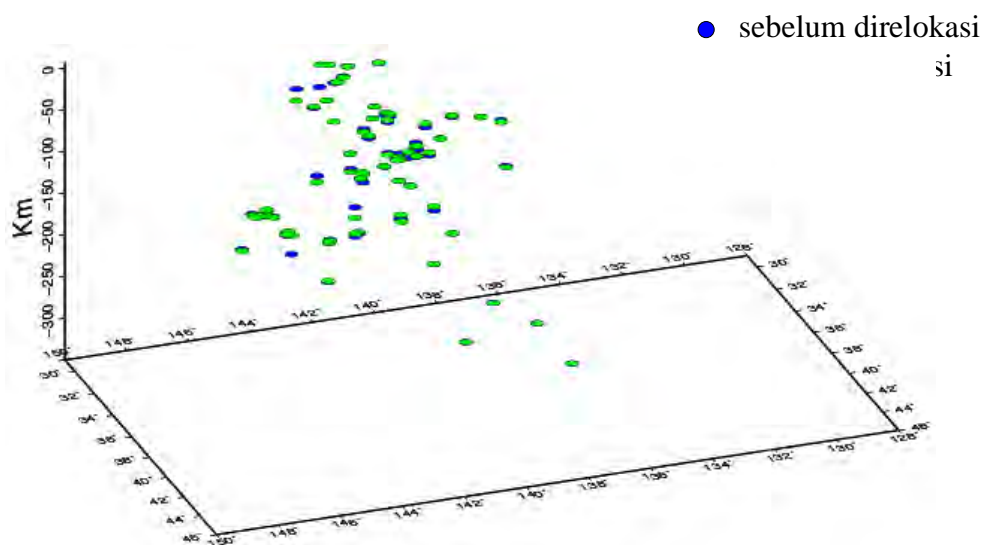
Gambar 4.6. Posisi gempa sebelum dan sesudah direlokasi

Dari Gambar 4.6 terlihat bahwa hampir semua lingkaran berwarna biru tidak terlihat karena tertutupi oleh lingkaran hijau. Hal ini menunjukkan bahwa semua *event* dapat direlokasi dan hasil relokasinya pun tidak terlalu jauh dari posisi hiposenter sebelum direlokasi. Jika digambarkan dalam posisi tampak samping maka seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4.7.



Gambar 4.7. Posisi Relokasi Hiposenter Tampak Samping

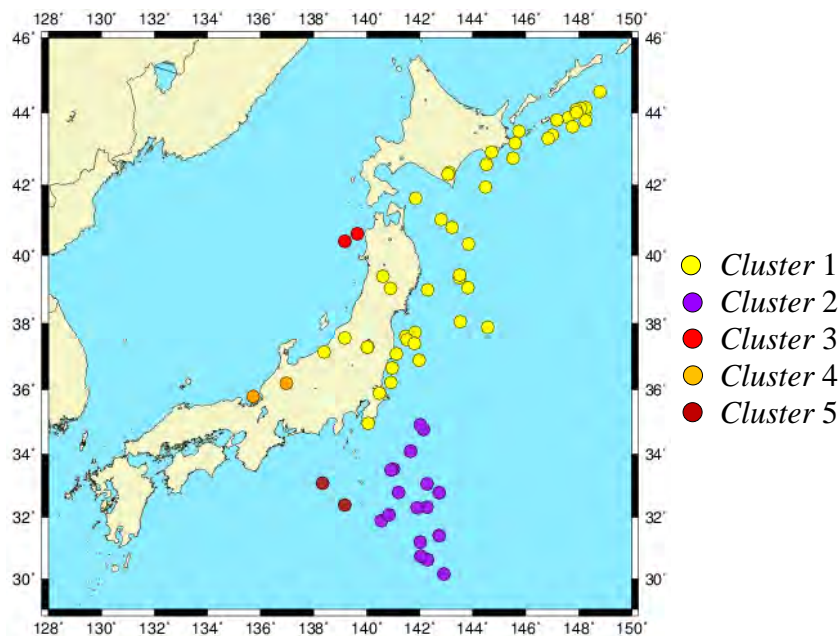
Sedangkan jika digambarkan dalam penampang 3D maka terlihat seperti Gambar 4.8.



Gambar 4.8. Posisi Relokasi Hiposenter dalam Penampang 3D

Berdasarkan Gambar 4.8 pergeseran posisi hiposenter sebelum dan sesudah relokasi lebih terlihat dengan jelas. Hal ini dikarenakan lebih banyak terjadi pergeseran hiposenter pada parameter kedalaman. Oleh karena itu pergeseran hiposenter akan lebih terlihat jika digambarkan dalam penampang 3D.

Jarak antar hiposenter saling berdekatan satu sama lain sehingga sangat sesuai jika dalam penelitian ini hiposenter direlokasi menggunakan metode *Double Difference*. Sebagian besar gempa terakumulasi pada bagian selatan Pulau Honshu karena pada bagian tersebut terdapat *megathrust* dimana lempeng laut Pasifik bertumbukan dengan lempeng Eurasia dan berada dekat dengan Palung Nankai. Selain itu juga terakumulasi di bagian utara Jepang dimana berada dekat dengan Palung Jepang. Sebaran hiposenter yang terlihat pada Gambar 4.6 menunjukkan bahwa sebagian besar gempa terjadi dekat dengan zona subduksi. Gempa-gempa yang terjadi pada daerah dekat dengan zona subduksi akan memiliki kedalaman yang dangkal, sedangkan semakin jauh dari zona subduksi maka kedalamannya akan bertambah. Terbukti bahwa sebagian besar gempa yang terelokasi terjadi pada kedalaman dangkal.



Gambar 4.9. Posisi Pembagian Cluster Sesudah Direlokasi

Selain merelokasi hiposenter, metode *Double Difference* juga mengelompokkan gempa-gempa yang terjadi ke dalam *cluster-cluster*. Pengelompokkan *cluster* tersebut didasarkan pada letak hiposenter yang saling berdekatan satu sama lain seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4.9. Gambar 4.9 menunjukkan bahwa hiposenter hasil relokasi dengan menggunakan metode *Double Difference* dibagi menjadi 5 *cluster*, dengan rincian sebagai berikut: *cluster* 1 terdiri dari 46 *event*, *cluster* 2 terdiri dari 17 *event*, *cluster* 3, 4, dan 5 sama-sama terdiri dari 2 *event*.

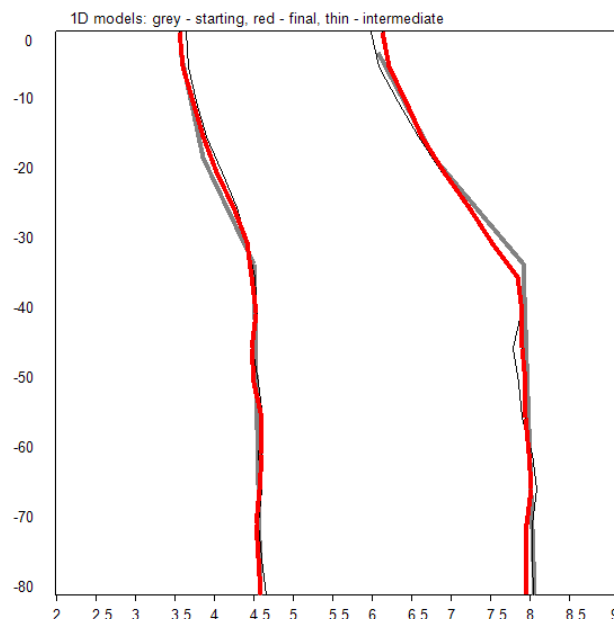
#### 4.5 Hasil Inversi Tomografi

Memasuki proses inversi tomografi, hal pertama yang dilakukan yaitu persiapan data *input*. Data *input* yang perlu disiapkan antara lain *inidata* yang di dalamnya berisi identitas *file rays* dan *stat\_ft*. Pada *file rays* berisi hiposenter *event* beserta waktu tempuh dari setiap stasiun. Seluruh identitas tersebut termuat dalam satu *file* agar dapat diolah secara simultan oleh *software* LOTOS-12. Sedangkan pada *file stat\_ft* berisi identitas stasiun berupa *latitude*, *longitude*, dan kedalamannya.

Tahapan yang kedua yaitu penentuan parameter berupa model kecepatan, parameter lokasi, dan inversi dilakukan oleh peneliti. Pada tahapan yang terakhir yakni menentukan banyaknya iterasi dan *output display*. Pemilihan jumlah iterasi didasarkan pada nilai RMS yang dihasilkan pada iterasi-iterasi sebelumnya. Jika nilai RMS sudah sesuai yang diharapkan, maka iterasi dapat dihentikan. *Output display* berupa *setver.dat*, *sethor.dat*, dan *config.dat*.

#### 4.5.1 Analisis Distribusi Kecepatan 3D

Algoritma LOTOS sendiri juga terdiri dari tiga tahapan. Tahapan yang pertama yaitu optimisasi yang simultan untuk model kecepatan 1D terbaik dan lokasi awal hiposenter. Beberapa langkah untuk mendapatkan model 1D optimum antara lain yaitu pemilihan data untuk optimisasi. Data yang dipilih yaitu data yang terdistribusi secara merata pada kedalaman yang sama. Agar hal tersebut tercapai, maka dipilih data dengan jumlah stasiun pencatat terbanyak untuk tiap interval kedalaman. Kemudian mengkalkulasi waktu tiba gelombang dengan menetapkan model kecepatan 1D yang didapat sebelumnya menggunakan *software* VELEST sebagai informasi awal.



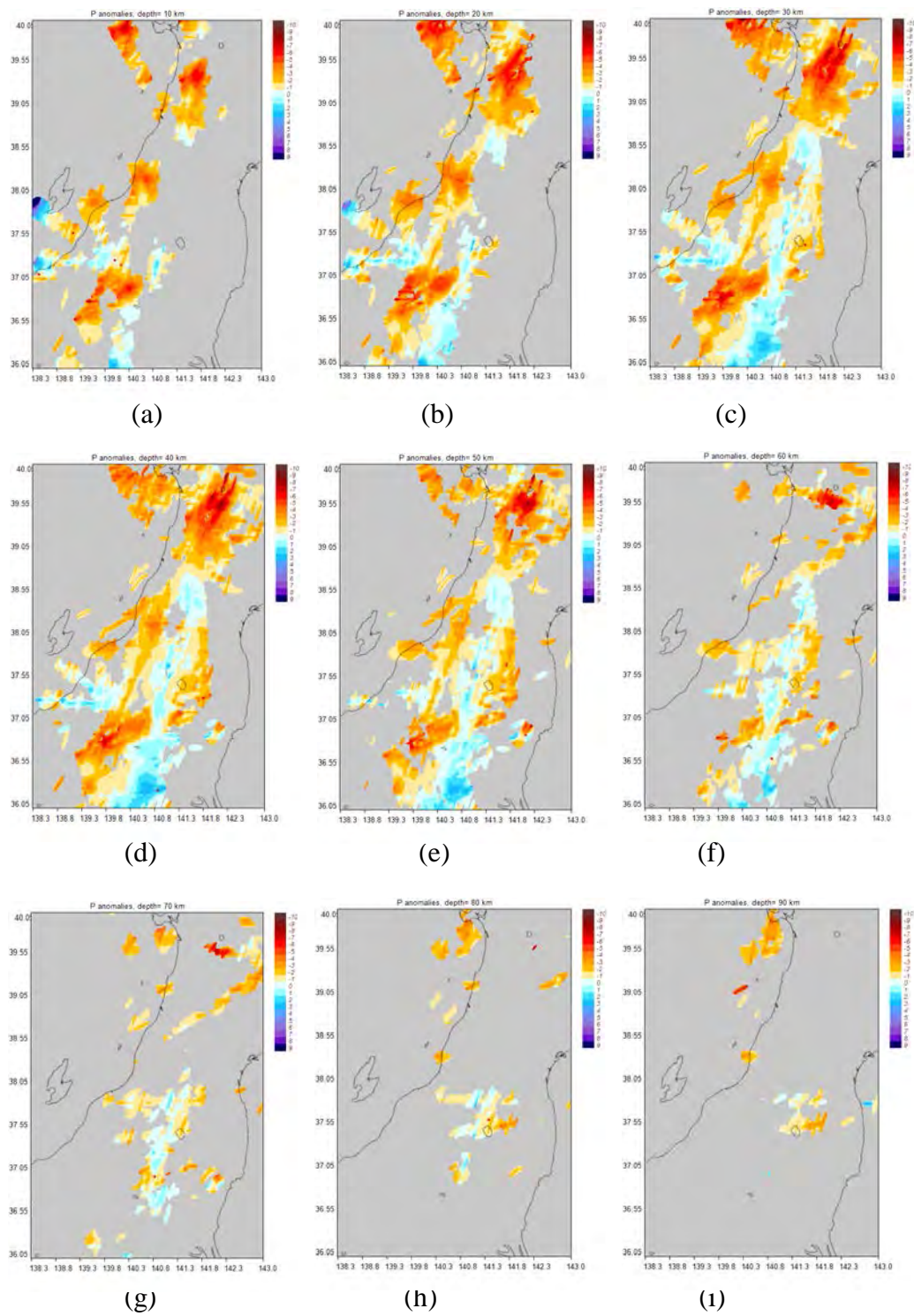
Gambar 4.10. Model Kecepatan Bumi 1D



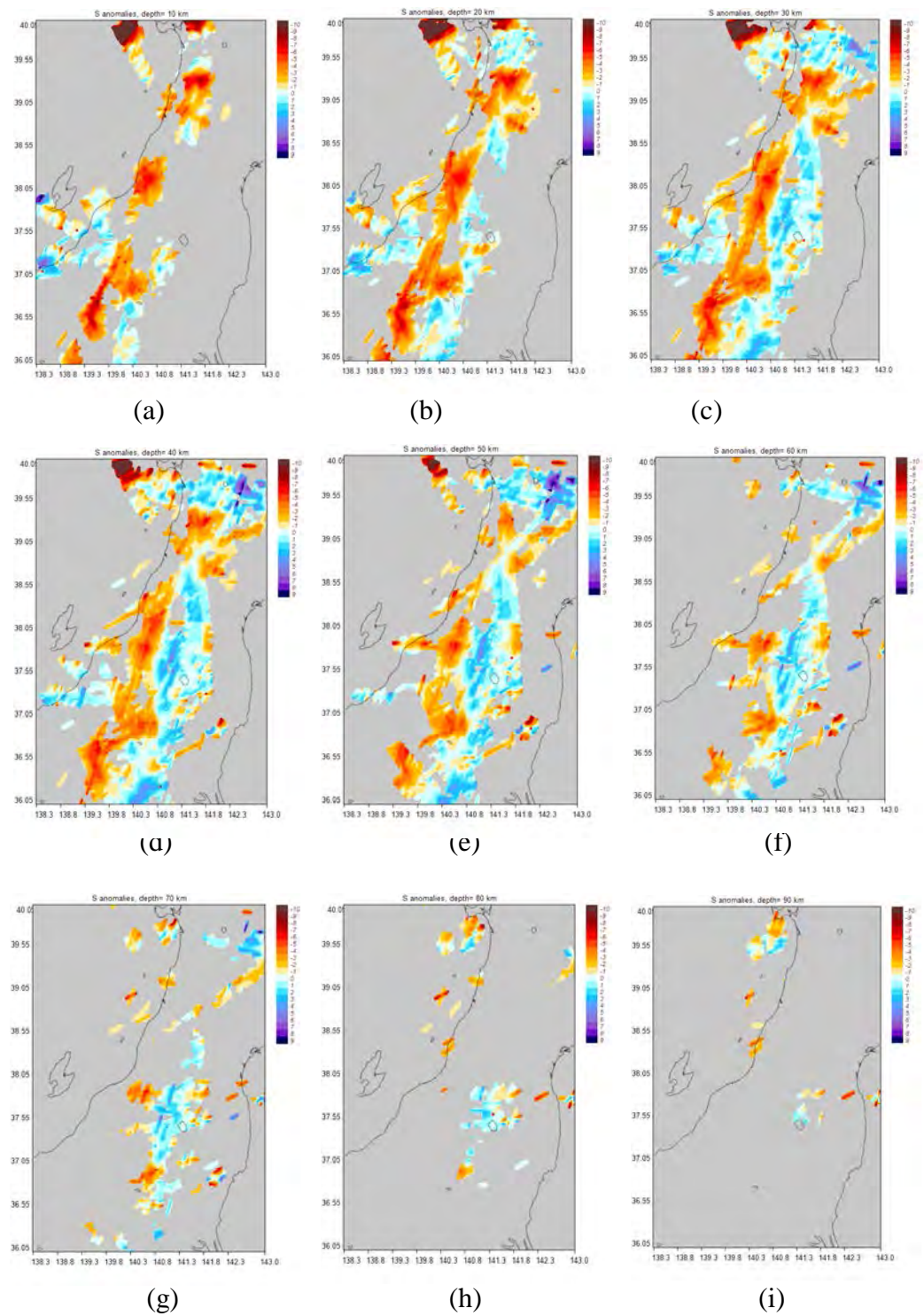
Gambar 4.10 adalah model 1D optimum sebagai hasil dari pengolahan menggunakan *software* LOTOS 12. Garis berwarna abu-abu merupakan model kecepatan awal yang digunakan sebagai informasi awal, garis yang tipis merupakan hasil setelah dilakukan iterasi 1 sampai 3, sedangkan garis berwarna merah merupakan hasil akhir setelah iterasi ke-4.

Tahapan yang kedua yaitu menggunakan algoritma *ray tracing* berdasarkan prinsip Fermat yang disebut juga sebagai *bending tracing* (Um dkk, 1987) untuk menentukan lokasi dalam model 3D dengan minimalisasi waktu tempuh gelombang yang diperoleh. Tahapan yang ketiga yaitu menggunakan metode parameterisasi dengan nodes yang juga telah dilakukan oleh Koulakov (2006). Jarak antara *nodes* diusahakan sekecil mungkin di dalam area dengan densitas sinar yang tinggi. Selanjutnya dilakukan inversi untuk matriks secara keseluruhan dengan menggunakan iterasi LSQR (Paige dkk, 1982).

Berdasarkan hasil pengolahan oleh *software* LOTOS, setelah melewati tahapan-tahapan seperti yang disebutkan di atas, semua *event* berhasil diolah seluruhnya dengan rincian 69 *event* yang terdiri dari 578 gelombang P dan 572 gelombang S. Iterasi hanya dilakukan sebanyak 1 kali saja karena RMS yang telah diperoleh relatif kecil sebesar 0,6990087 untuk gelombang P dan 0,9803055 untuk gelombang S sehingga tidak perlu dilakukan iterasi kembali. Pencitraan anomali ditampilkan dalam besaran persentase deviasi  $V_p$  dan  $V_s$  berdasarkan waktu tempuh gelombang. Satuan dari besaran persentase deviasi tersebut adalah km/s. Harga anomali deviasi terhadap distribusi  $V_p$  dan  $V_s$  berkisar antara -10 sampai +10. Pada bidang horizontal ditampilkan irisan pada 9 kedalaman dengan pertimbangan bahwa sebagian besar gempa terjadi pada kedalaman-kedalaman ini, diantaranya pada kedalaman 10 km, 20 km, 30 km, 40 km, 50 km, 60 km, 70 km, 80 km, dan 90 km seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4.11 dan Gambar 4.12.



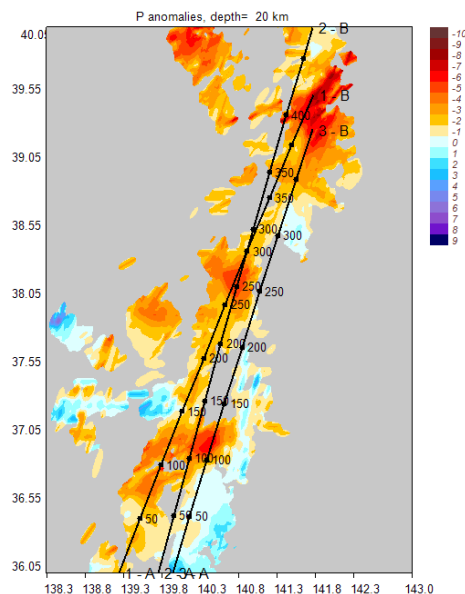
Gambar 4.11. Distribusi anomali  $V_p$  pada irisan horizontal tomogram pada kedalaman (a) 10 km, (b) 20 km, (c) 30 km, (d) 40 km, (e) 50 km, (f) 60 km, (g) 70 km, (h) 80 km dan (i) 90 km



Gambar 4.12 Distribusi anomali Vs pada irisan horizontal tomogram pada kedalaman (a) 10 km, (b) 20 km, (c) 30 km, (d) 40 km, (e) 50 km, (f) 60 km, (g) 70 km, (h) 80 km dan (i) 90 km

Gambar 4.11 dan Gambar 4.12 merupakan distribusi Vp dan Vs sebagai hasil inversi pada irisan horizontal. Warna merah tua dengan nilai -10 mewakili anomali negatif maksimum dan warna biru tua dengan nilai +9 mewakili anomali positif maksimum. Anomali negatif lebih mencerminkan daerah yang lemah, seringkali dikaitkan dengan fluida yang meningkat dan pelelehan slab subduksi yang disebabkan adanya fase transisi (Suantika, 2009).

Berdasarkan Gambar 4.11 dan Gambar 4.12, Vp dan Vs beranomali negatif jelas terlihat pada kedalaman 10 km, 20 km, 30 km, 40 km, dan 50 km, sedangkan kurang teresolusi pada kedalaman 60 km, 70 km, 80 km, dan 90 km. Hal ini juga dibuktikan dengan banyaknya gempa yang terjadi pada kedalaman kurang dari 60 km yaitu sebanyak 56 gempa atau 81% dari keseluruhan gempa. Anomali negatif tersebut menyebar di beberapa bagian seperti di bagian utara Pulau Honshu, di bagian selatan Pulau Honshu, dan bagian barat Pulau Honshu yang dekat dengan Laut Jepang dengan posisi *longitude* antara 138,3 sampai 143 dan *latitude* antara 36,05 sampai 40. Sesuai dengan keadaan yang sebenarnya bahwa pada daerah tersebut terdapat zona subduksi antara lempeng Eurasia bagian timur, Laut Filipina, dan Pasifik bagian barat.

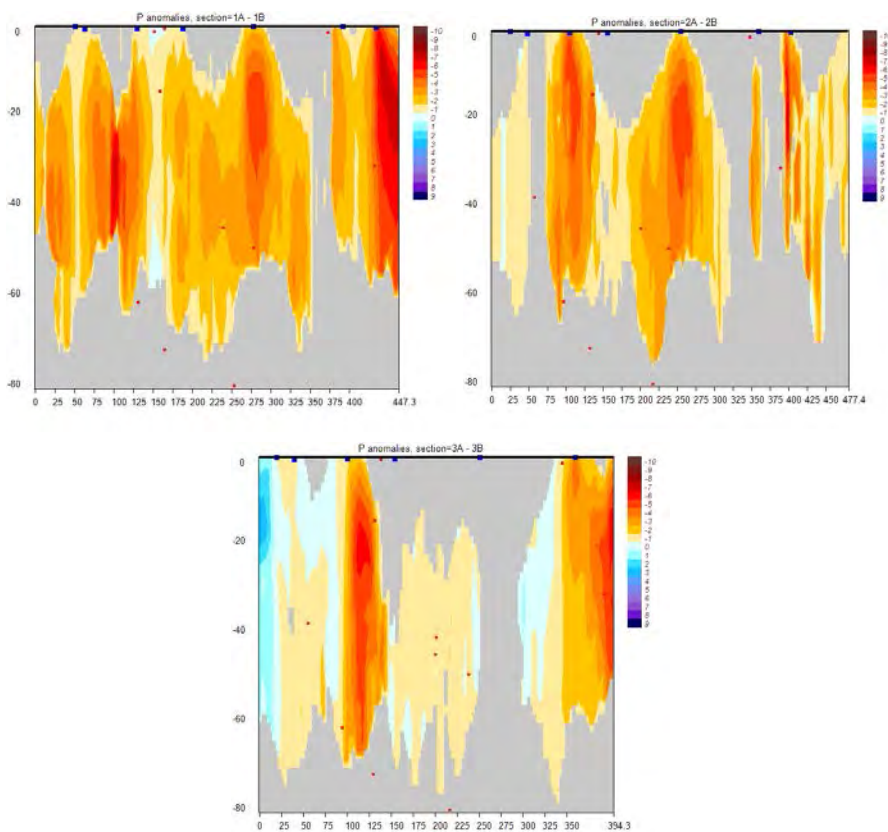


Gambar 4.13 Garis *cross section* untuk menampilkan distribusi Vp dan Vs dan rasio Vp/Vs pada irisan vertikal

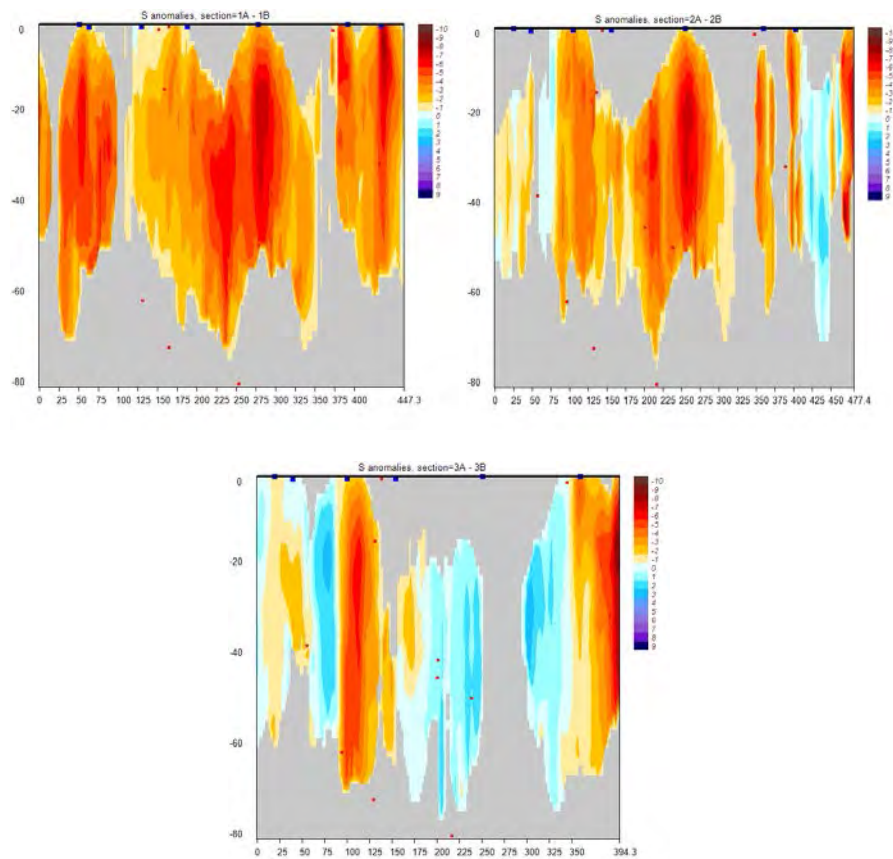


Gambar 4.13 merupakan garis *cross section* yang dapat digunakan sebagai acuan analisis distribusi anomali Vp dan Vs secara lebih detail. Ada 3 garis *cross section* yang dipilih diantaranya pada *longitude* 139,3121222101 dan *latitude* 36,0524887609 sampai pada *longitude* 141,8127421000 dan *latitude* 39,5590321000 (1A-1B), irisan yang kedua yaitu pada *longitude* 139,8176247901 dan *latitude* 36,0524887609 sampai dengan *longitude* 141,8004434000 dan *latitude* 40,0543289000 (2A-2B), dan irisan yang ketiga yaitu terletak pada *longitude* 140,0001513426 dan *latitude* 36,0524887609 sampai dengan *longitude* 141,8009915230 dan *latitude* 39,3010976405 (3A-3B). Ketiga garis *cross section* tersebut dipilih karena pada sepanjang garis terlihat jelas adanya anomali negatif Vp dan Vs.

Pada Gambar 4.14 dan Gambar 4.15 merupakan distribusi dari hasil inversi Vp dan Vs pada irisan vertikal yang diperoleh dari hasil *cross section*.

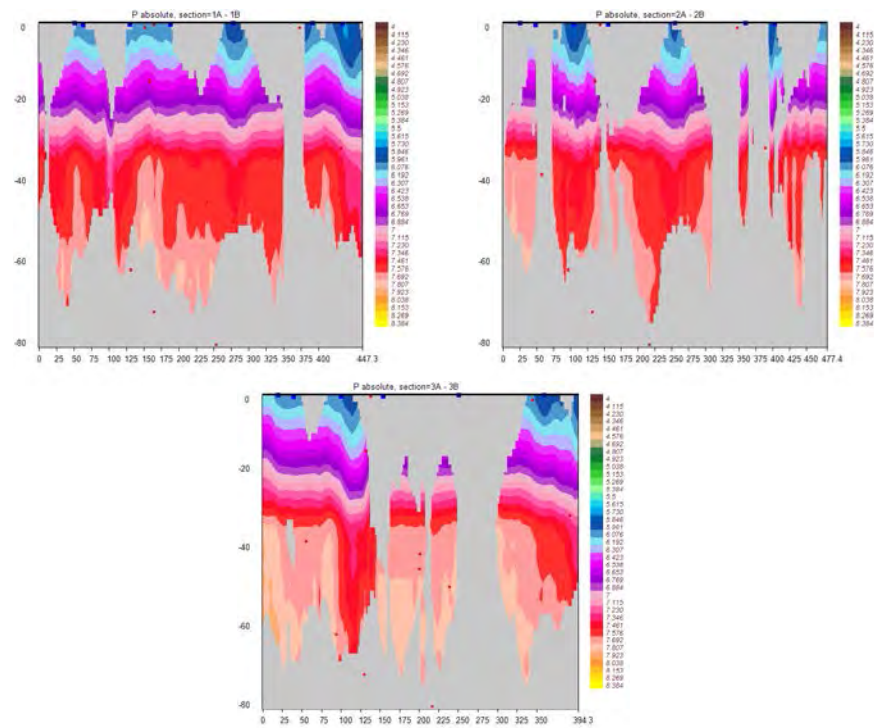


Gambar 4.14 Anomali Vp pada irisan vertikal

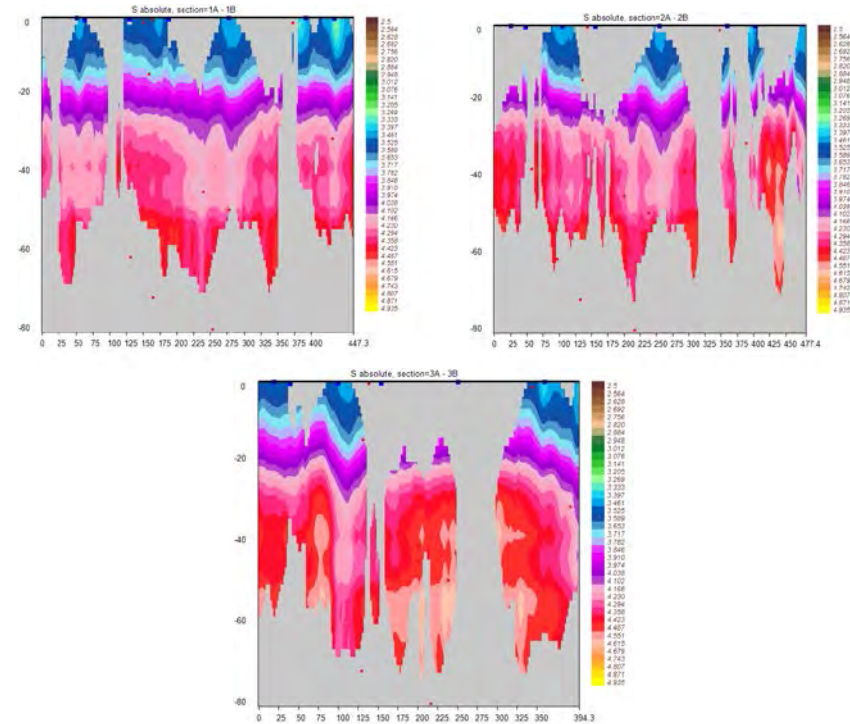


Gambar 4.15 Anomali Vs pada irisan vertikal

Pada gambar tersebut terlihat jelas bahwa terdapat anomali negatif gelombang P maksimum pada irisan 1A-1B pada jarak 75 km sampai 100 km di kedalaman 25 km sampai 45 km, dan terdapat pula pada jarak lebih dari 400 km di kedalaman 10 km sampai 60 km. Pada irisan 2A-2B terdapat pada jarak 400 km di kedalaman 0 km sampai 25 km, sedangkan pada irisan 3A-3B terdapat pada jarak 100 km sampai 125 km di kedalaman 10 km sampai 65 km dan terdapat pula pada jarak sekitar 394 km di kedalaman 10 km sampai 50 km. Selanjutnya anomali negatif gelombang S maksimum pada irisan 1A-1B pada jarak 275 km di kedalaman 10 km sampai dengan 40 km, dan pada jarak lebih dari 400 km di kedalaman 10 km. Pada irisan 2A-2B terdapat anomali negatif maksimum gelombang S pada jarak 250 km di kedalaman 20 km sampai 40 km, sedangkan pada irisan 3A-3B terdapat pada jarak lebih dari 300 km di kedalaman 10 km sampai 60 km.



Gambar 4.16 Anomali kecepatan absolut gelombang P pada irisan vertikal



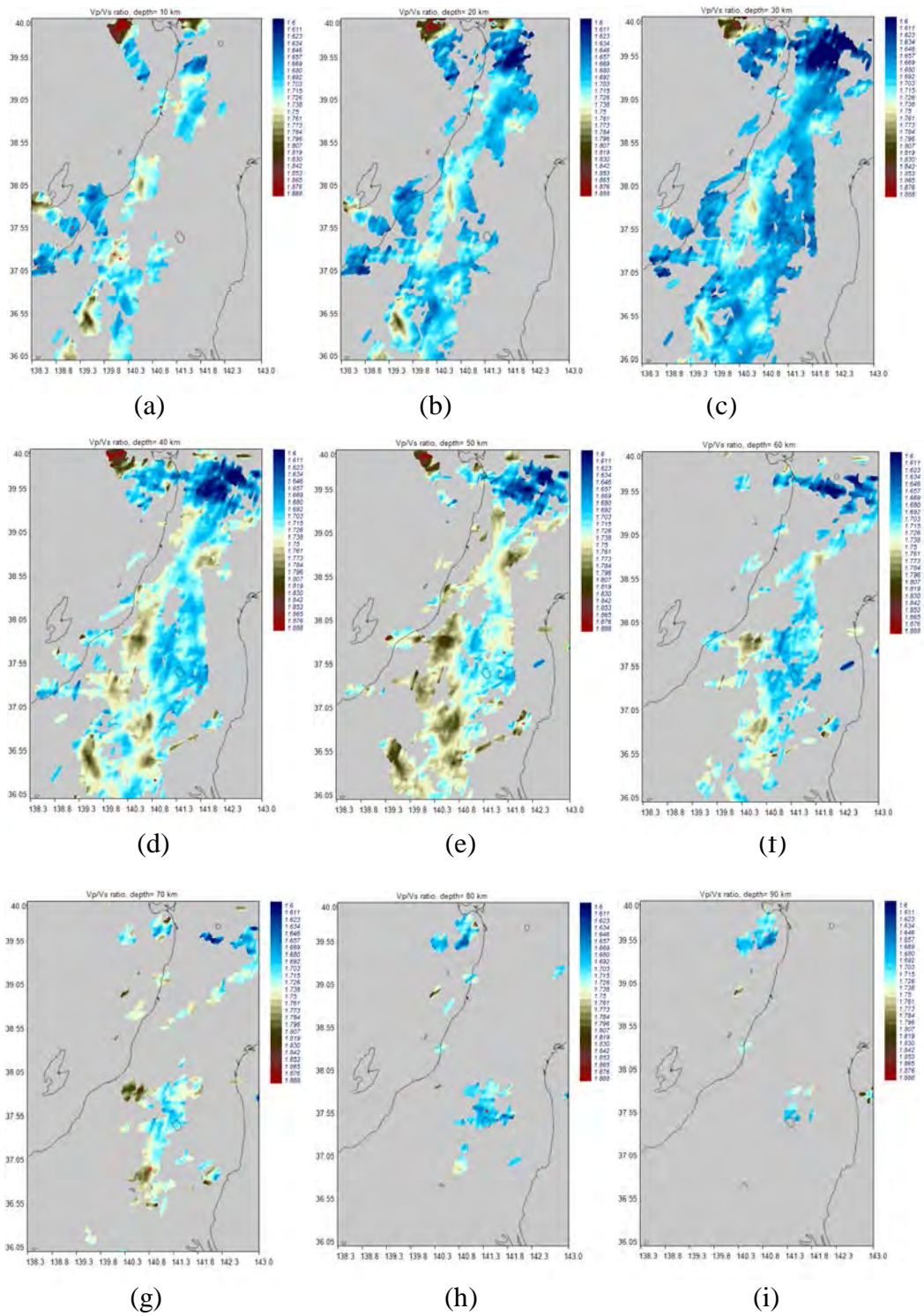
Gambar 4.17 Anomali kecepatan absolut gelombang S pada irisan vertikal

Gambar 4.16 dan Gambar 4.17 merupakan anomali kecepatan absolut gelombang P dan gelombang S pada irisan vertikal. Pada gambar tersebut terlihat bahwa maksimum kedalaman yang teresolusi dengan baik yaitu sampai kedalaman 80 km karena sebagian besar gempa merupakan gempa dangkal sehingga pada kedalaman lebih dari 80 km tidak akan menghasilkan resolusi yang baik dikarenakan sedikitnya gempa yang terjadi pada kedalaman tersebut. Dalam penelitian ini yaitu wilayah Jepang diperkirakan terdapat beberapa lapisan yaitu kerak atas di kedalaman sekitar 0 km sampai 25 km, kerak bawah pada kedalaman sekitar 25 km sampai 45 km dan mantel atas pada kedalaman lebih dari 45 km.

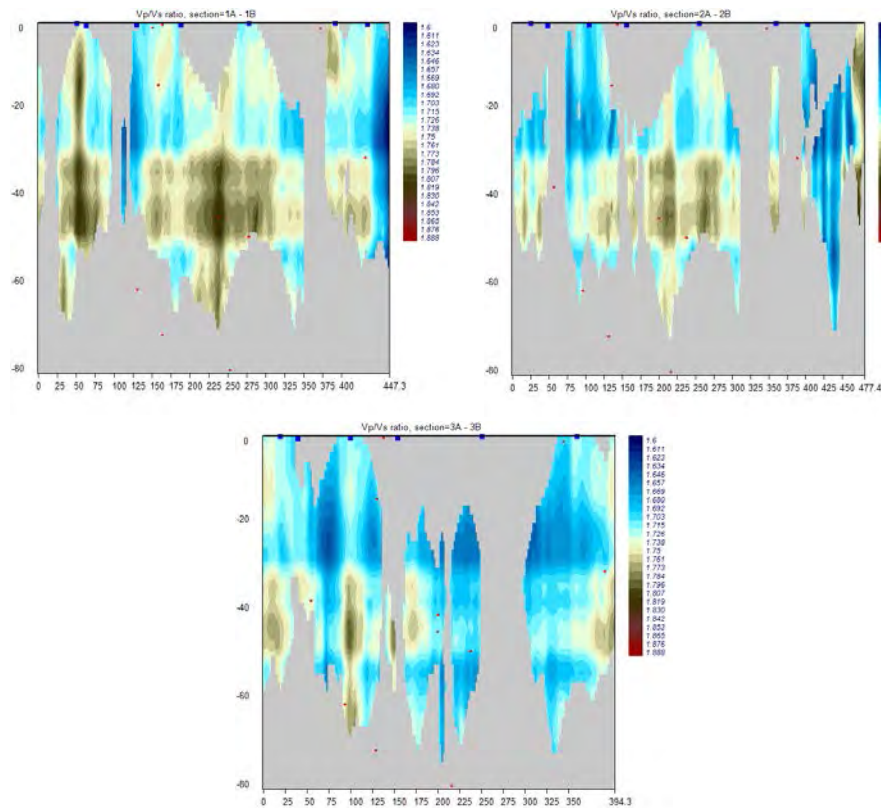
Pada bagian kerak atas diperoleh kecepatan absolut gelombang P meningkat mulai 5,961 km/s sampai 7,000 km/s, pada bagian kerak bawah diperkirakan kecepatan gelombang P sekitar 7,461 km/s dan pada bagian mantel atas diperkirakan kecepatan gelombang P sekitar meningkat mulai 7,461 km/s sampai 7,692 km/s. Sedangkan untuk kecepatan absolut gelombang S pada bagian kerak atas diperoleh kecepatan gelombang S yang meningkat mulai 3,461 km/s sampai 4,166 km/s dan pada bagian kerak bawah kecepatan gelombang S sekitar 4,230 km/s sampai 4,358 km/s dan pada bagian mantel atas diperkirakan kecepatan gelombang-S sekitar 4,423 km/s.



#### 4.5.2 Analisis Struktur Vp/Vs



Gambar 4.18 Distribusi rasio Vp/Vs pada irisan horizontal tomogram pada kedalaman (a) 10 km, (b) 20 km, (c) 30 km, (d) 40 km, (e) 50 km, (f) 60 km, (g) 70 km, (h) 80 km dan (i) 90 km



Gambar 4.19 Distribusi rasio Vp/Vs pada irisan vertikal

Gambar 4.18 merupakan rasio Vp/Vs sebagai hasil inversi pada irisan horizontal. Warna merah tua dengan nilai 1,888 mewakili rasio Vp/Vs maksimum dan warna biru tua dengan nilai 1,6 mewakili rasio Vp/Vs minimum. Rasio Vp/Vs yang tinggi menunjukkan adanya retakan yang berisi fluida dan tingkat saturasi air yang tinggi pula (Moos and Zoback, 1983). Sedangkan rasio Vp/Vs yang rendah menunjukkan adanya batuan kering yang terisi oleh gas. Batuan yang banyak mengandung fluida akan menyebabkan perubahan porositas yang dapat menimbulkan keretakan dan memicu terjadinya gempa bumi.

Berdasarkan Gambar 4.18 rasio Vp/Vs dapat jelas terlihat pada kedalaman 10 km, 20 km, 30 km, 40 km, dan 50 km, sedangkan kurang teresolusi pada kedalaman 60 km, 70 km, 80 km, dan 90 km. Hal ini juga dikarenakan sebagian besar gempa terjadi pada kedalaman kurang dari 60 km. Pada kedalaman 10 km, 20 km, dan 30 km dapat teresolusi dengan jelas dengan nilai rasio Vp/Vs maksimumnya sebesar 1,888 di bagian utara Pulau Honshu dan nilai rasio Vp/Vs

minimum sebesar 1,6 menyebar di hampir seluruh wilayah Pulau Honshu. Berdasarkan pencitraan di bidang horizontal, rasio  $V_p/V_s$  memiliki nilai yang lebih rendah di daerah dekat permukaan jika dibandingkan dengan daerah yang lebih dalam.

Pada irisan bidang vertikal yang ditunjukkan pada Gambar 4.19, rasio  $V_p/V_s$  rendah diperoleh mayoritas pada kedalaman sekitar 20 km hingga 60 km yang terletak pada utara Pulau Honshu. Sedangkan rasio  $V_p/V_s$  yang tinggi berada pada mayoritas kedalaman 0 km hingga 50 km yang letaknya hampir berdekatan. Anomali yang rendah menunjukkan kecenderungan dikelilingi oleh hiposenter gempa. Hal ini diperkuat dengan 33 gempa atau sekitar 50% yang terjadi pada kedalaman antara 0 km sampai 40 km. Penyesuaian dengan kenampakan alam menunjukkan bahwa pada bagian utara Jepang terdapat beberapa pegunungan dan gunung di wilayah tersebut, antara lain Gunung Fuji, Gunung Zao, dan Pegunungan Bandai.

*(halaman ini sengaja dikosongkan)*

## **BAB V**

### **KESIMPULAN DAN SARAN**

#### **5.1 Kesimpulan**

Berdasarkan hasil dan analisis yang telah dibahas pada bab sebelumnya, maka didapatkan beberapa kesimpulan sebagai berikut:

1. Terdapat 69 *event* gempa yang terjadi di Jepang dengan *magnitude* di atas 4,7 SR dan sebanyak 1153 gelombang yang dianalisis, dengan rincian 579 gelombang P dan 574 gelombang S.
2. Kecepatan gelombang P ( $V_p$ ) dan kecepatan gelombang S ( $V_s$ ) pada beberapa bagian dalam Bumi adalah sebagai berikut:
  - Pada kerak bagian atas,  $V_p$  sekitar 5,961 km/s sampai 7,000 km/s dan  $V_s$  sekitar 3,461 km/s sampai 4,166 km/s,
  - Pada kerak bagian bawah,  $V_p$  sekitar 7,461 km/s dan  $V_s$  sekitar 4,230 km/s sampai 4,358 km/s, dan
  - Pada mantel bagian atas,  $V_p$  sekitar 7,461 km/s sampai 7,692 km/s dan  $V_s$  sekitar 4,423 km/s.
3. Rasio  $V_p/V_s$  rendah diperoleh mayoritas pada kedalaman sekitar 20 km hingga 60 km, sedangkan rasio  $V_p/V_s$  yang tinggi berada pada mayoritas kedalaman 0 km hingga 50 km. Nilai anomali  $V_p/V_s$  yang tinggi mengindikasikan sebuah kecenderungan bahwa daerah tersebut dikelilingi oleh hiposenter gempa bumi.
4. Pada pencitraan 3D menunjukkan bahwa terdapat variasi anomali  $V_p$  dan  $V_s$  di sekitar bagian selatan Pulau Honshu, Jepang. Daerah tersebut memiliki anomali negatif. Hal ini dikarenakan terdapat tiga lempeng tektonik yang bertumbukan seperti lempeng Eurasia bagian timur, Laut Filipina, dan lempeng laut Pasifik bagian barat di bagian selatan Jepang. Selain itu terdapat beberapa pegunungan dan gunung di wilayah tersebut, antara lain Gunung Fuji, Gunung Zao, dan Pegunungan Bandai di bagian utara Jepang.

## **5.2   Saran**

Adapun saran dari penulis yaitu perlunya penambahan rentang waktu pengumpulan data gempa di Jepang, akan lebih baik jika data gempa terjadi pada rentang tahun 2010 sampai 2012. Hal ini dikarenakan agar dapat diketahui perbedaan tomografi pada wilayah Jepang sebelum dan sesudah terjadinya tsunami Jepang (Maret 2011).

## Daftar Pustaka

- Grandis, Hendra. 2009. *Pengantar Pemodelan Inversi Geofisika*. Jakarta: Himpunan Ahli Geofisika Indonesia (HAGI).
- Gubbins, David. 1990. *Seismology and Plate Tectonics*. Cambridge University Press.
- Gylfy P.H., Axel Bjornsson. 1991. *Geophysical Exploration for Geothermal Resources Principles and Application*. UNU Geothermal Training Programme Reykjavik. Iceland
- Iyer, H.M. dan Hirahara, K.. 1993. *Seismic Tomography: Theory and Practice*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Kayal, J. 2002. *Seismic Waves and Earthquake Location*. Geological Survey of India.
- Kissling, E., Ellsworth, W.L., Eberhart-Philips, D., Kradolfer, U. 1994. *Initial Reference Model in Local Earthquake Tomography*. J. Geophys. Res., Vol.99 (B10), hal. 19.635-19.646.
- Koulakov I.. 2009. LOTOS Code for Local Earthquake Tomographic Inversion. Benchmarks for testing tomographic algorithms. Bulletin of the Seismological Society of America, Vol. 99, No. 1, pp. 194-214.
- Koulakov I, dan S.V. Sobolev. 2006. A Tomographic Image of Indian Lithosphere Break-off beneath the Pamir Hindukush Region, *Geophys.Journ.Int.*,164, p.425-440.
- Lo, Tien-when dan Inderwiesen, Philip L.. 1994. *Fundamentals of Seismic Tomography*. Society of Exploration Geophysicists.
- Menke, William. 1984. *Geophysical Data Analysis: Discrete Inverse Theory*. Orlando: Academic Press Inc.
- Moos, D., dan Zoback. M. 1983. In Situ Studies of Velocity in Fractured Crystalline Rock. Journal of Geophysical Research. No. 88.
- Paige, C.C., dan M.A. Saunders. 1982. LSQR: An Algorithm for Sparse Linear Equations and Sparse Least Squares, *ACM Trans. Math. Soft.*, 8, 43-71.
- Pribadi, Erwin. 2010. "Delineasi Zona Rekahan pada Reservoir Geothermal Melalui Pengamatan Mikroseismik". Universitas Indonesia. Depok
- Suantika, G. 2009. "Pencitraan Tomografi Atenuasi Seismik 3D untuk Delineasi Struktur Internal dan Karakterisasi Sifat Batuan di Bawah Gunungapi Guntur". Disertasi. Tidak dipublikasikan. Institut Teknologi Bandung.
- Um, J. dan Thurber, C., 1987. *A Fast Algorithm for Two-point Seismic Ray Tracing*, Bull. siesm. Soc. Am., 77, hal 972-986.
- Van der Sluis, A., dan Van der Vorst. 1987. Numerical Solution of Large, Spase Linear Algebraic Systems Arising from Tomographic Problems, in: *Seismic Tomography, edited by G. Nolet, pp. 49-83, Reidel, Dortrecht*.
- Waldhauser, F. and Ellsworth, W.L. 2000. *A Double-Difference Earthquake Location Algorithm: Method and Application to the Northern Hayward Fault, California*, Bull. Seism. Soc. Am., Vol. 90, hal. 1353-1368.
- <http://bmkg.stageoflampung.com>
- <http://fnet.bosai.go.jp>

*(halaman ini sengaja dikosongkan)*



## LAMPIRAN 1

### DATA GEMPA DARI NIED

No	Origin	Lat (°)	Long (°)	Depth	Mag
1	<u>2010/01/06,14:20:04.18</u>	37.8960	144.5643	45.00	5.2
2	<u>2010/01/14,18:46:25.57</u>	42.3527	143.1180	51.49	5.0
3	<u>2010/01/15,15:44:45.80</u>	43.3772	147.0550	37.74	5.1
4	<u>2010/01/17,06:04:38.53</u>	38.0518	143.5272	41.00	5.6
5	<u>2010/01/25,07:15:09.21</u>	30.8743	131.1505	48.65	5.4
6	<u>2010/02/05,06:48:08.48</u>	40.5582	136.2082	400.66	4.9
7	<u>2010/02/06,22:08:53.72</u>	44.0710	148.4157	0.00	4.9
8	<u>2010/02/16,01:57:14.20</u>	40.3193	143.8433	23.00	5.3
9	<u>2010/02/16,19:59:30.51</u>	34.9508	140.0872	82.66	4.7
10	<u>2010/02/18,01:13:16.47</u>	42.6203	131.0635	619.00	6.8
11	<u>2010/02/20,11:47:56.16</u>	43.9685	148.2317	0.00	5.0
12	<u>2010/02/28,08:17:41.45</u>	34.7762	142.1430	42.00	5.5
13	<u>2010/02/28,22:07:46.69</u>	39.3908	140.6098	118.36	4.9
14	<u>2010/03/06,13:31:11.06</u>	43.8840	147.6177	6.00	5.5
15	<u>2010/03/12,17:32:06.40</u>	34.9110	142.0265	51.65	5.1
16	<u>2010/03/13,12:46:26.75</u>	37.6142	141.4717	77.70	5.5
17	<u>2010/03/14,07:04:13.08</u>	33.5298	141.0095	56.00	4.8
18	<u>2010/03/14,08:08:04.18</u>	37.7242	141.8180	39.75	6.7
19	<u>2010/03/27,20:02:34.42</u>	33.5070	140.9235	50.00	4.7
20	<u>2010/04/05,09:36:33.92</u>	36.9058	141.9818	44.79	4.7
21	<u>2010/04/08,18:41:49.39</u>	42.9168	144.7228	57.32	4.8
22	<u>2010/04/14,08:16:22.84</u>	31.8795	140.5683	71.89	4.9
23	<u>2010/04/22,19:58:36.74</u>	43.7883	148.2795	0.00	4.9
24	<u>2010/04/23,01:59:13.78</u>	32.3143	142.2645	17.00	4.9
25	<u>2010/05/01,09:20:37.29</u>	37.5592	139.1912	9.26	4.9
26	<u>2010/05/12,18:55:31.94</u>	32.7895	141.2052	46.00	4.8
27	<u>2010/05/13,11:01:14.29</u>	33.4080	131.6648	90.04	4.7
28	<u>2010/05/18,08:33:44.85</u>	43.6500	147.7525	0.00	4.7
29	<u>2010/05/31,16:34:56.75</u>	30.6190	142.3000	45.00	5.0
30	<u>2010/06/01,04:49:22.06</u>	37.5122	141.5387	45.44	4.8
31	<u>2010/06/05,05:22:03.29</u>	43.2702	146.8683	62.32	5.5
32	<u>2010/06/05,16:36:37.60</u>	33.0922	138.3395	340.39	4.7
33	<u>2010/06/10,00:03:56.71</u>	33.0622	142.2865	0.00	4.8
34	<u>2010/06/13,03:32:57.02</u>	37.3960	141.7957	40.30	6.2

<b>No</b>	<b>Origin</b>	<b>Lat (°)</b>	<b>Long (°)</b>	<b>Depth</b>	<b>Mag</b>
35	<u>2010/06/27,21:03:25.38</u>	41.6260	141.8332	57.11	5.1
36	<u>2010/06/28,12:07:23.67</u>	30.7443	142.0380	18.00	5.7
37	<u>2010/07/01,14:48:12.75</u>	32.0768	140.8420	5.00	4.7
38	<u>2010/07/02,01:19:46.18</u>	44.6288	148.8292	30.00	4.8
39	<u>2010/07/03,19:33:12.17</u>	39.0247	140.9128	7.12	5.2
40	<u>2010/07/05,00:53:14.49</u>	43.8185	147.1798	30.00	4.9
41	<u>2010/07/05,15:48:36.02</u>	35.7890	135.7212	346.18	4.7
42	<u>2010/07/08,12:23:27.20</u>	42.5733	144.5287	58.98	4.7
43	<u>2010/07/20,03:25:43.44</u>	44.1272	148.2612	0.00	4.9
44	<u>2010/07/20,21:19:18.51</u>	34.2052	135.6943	57.95	5.1
45	<u>2010/07/22,21:06:31.49</u>	35.8787	140.4855	35.02	5.0
46	<u>2010/07/26,23:31:03.16</u>	38.9972	142.3078	25.37	5.3
47	<u>2010/07/31,03:52:55.92</u>	32.3885	139.1715	251.49	4.7
48	<u>2010/08/04,20:09:36.90</u>	44.0927	148.0647	0.00	4.7
49	<u>2010/08/10,05:50:34.64</u>	39.3487	143.4947	30.00	6.3
50	<u>2010/08/10,16:00:39.28</u>	39.4305	143.5243	40.00	4.7
51	<u>2010/08/13,20:19:44.61</u>	32.7803	142.7385	30.00	4.7
52	<u>2010/08/18,23:33:11.66</u>	32.0505	138.3285	395.54	5.3
53	<u>2010/08/26,15:08:04.23</u>	36.1918	136.9672	285.77	5.2
54	<u>2010/08/31,02:30:31.56</u>	40.4028	139.1747	33.48	4.9
55	<u>2010/09/03,21:15:29.38</u>	42.7432	145.5135	61.25	5.1
56	<u>2010/09/13,23:05:12.56</u>	32.3033	141.9037	0.00	5.0
57	<u>2010/09/17,06:47:30.90</u>	31.4083	142.7338	57.00	4.9
58	<u>2010/09/17,17:58:36.63</u>	30.1613	142.8980	50.00	4.9
59	<u>2010/09/21,12:05:31.40</u>	44.0043	148.2205	0.00	4.9
60	<u>2010/09/21,20:15:10.93</u>	40.6197	139.6517	192.35	4.9
61	<u>2010/09/27,16:13:38.72</u>	43.5008	145.7598	98.79	5.3
62	<u>2010/09/29,03:01:57.60</u>	37.2985	140.0453	6.34	4.8
63	<u>2010/09/29,07:59:55.98</u>	37.2850	140.0255	7.62	5.7
64	<u>2010/09/30,12:47:09.52</u>	37.0835	141.1223	51.38	4.8
65	<u>2010/10/03,00:26:52.83</u>	37.1383	138.4177	22.36	4.7
66	<u>2010/10/10,02:27:49.65</u>	31.2035	142.0160	34.00	4.7
67	<u>2010/10/14,09:41:34.28</u>	44.0652	147.8938	0.00	5.0
68	<u>2010/10/14,13:58:55.50</u>	42.3128	143.0695	53.04	5.5
69	<u>2010/11/14,06:10:27.08</u>	34.0880	141.6608	40.57	5.1

## LAMPIRAN 2

### DATA STASIUN

No	Stasiun	Lat	Long
1	ABU	34.8635	135.571
2	ADM	37.9046	138.430
3	AOG	36.6342	139.421
4	ASI	36.6342	139.421
5	FUJ	35.2307	138.418
6	FUK	32.7177	128.757
7	GJM	39.9555	140.111
8	HID	42.8208	142.415
9	HJO	33.1048	139.802
10	HRO	37.2246	140.878
11	HSS	42.9672	141.229
12	IMG	42.3928	140.141
13	INN	33.4701	131.306
14	ISI	34.0606	134.455
15	IYG	40.1217	141.583
16	JIZ	34.9167	138.994
17	KIS	33.8652	135.891
18	KMT	33.6782	135.490
19	KMU	42.2391	142.963
20	KNM	35.7168	137.178
21	KNP	43.7625	143.708
22	KNY	34.8738	138.068
23	KSK	38.2585	140.583
24	KSN	38.9672	141.530
25	KSR	42.9820	144.485
26	KZK	37.2977	138.514
27	KZS	34.2056	139.149
28	NAA	35.2239	137.362
29	NKG	44.8017	142.085
30	NMR	43.3673	145.738
31	NOK	34.1656	135.348
32	NOP	44.3218	142.938
33	NRW	34.7682	133.533
34	NSK	34.3403	132.002
35	ONS	36.1557	138.982
36	OSW	37.9683	139.450

<b>No</b>	<b>Stasiun</b>	<b>Lat</b>	<b>Long</b>
37	SAG	36.2553	133.305
38	SBR	33.5052	130.253
39	SBT	37.9683	139.450
40	SGN	35.5096	138.944
41	SHR	44.0563	144.994
42	SIB	31.9698	130.349
43	SRN	36.2018	136.630
44	STM	32.8870	129.724
45	TGA	35.1846	136.338
46	TGW	33.9734	132.932
47	TKD	32.8179	131.387
48	TKO	31.8931	131.232
49	TMC	32.6063	130.915
50	TMR	41.1016	141.383
51	TSK	36.2141	140.090
52	TTO	35.8363	138.121
53	TYS	39.3772	141.593
54	UMJ	33.5795	134.037
55	URH	42.9298	143.671
56	WJM	37.4021	137.026
57	WTR	34.3739	136.575
58	YAS	35.6570	135.161
59	YMZ	36.9267	140.244
60	YSI	35.1942	132.886
61	YTY	34.2835	131.036
62	YZK	35.0888	134.459

### LAMPIRAN 3

#### DATA TRAVEL TIMES

No.	Origin Time	Stasiun	Tp (s)	Ts (s)
1.	2010/01/06,14:20:04.18	ADM	70.815	128.293
		ASI	63.954	112.977
		IYG	49.686	86.188
		KMU	67.988	116.717
		KSK	49.142	86.402
		KSN	41.399	72.051
		KZK	71.365	122.389
		ONS	69.933	121.598
		SBT	61.324	103.914
		TMR	58.639	105.533
		TSK	57.758	100.906
		TYS	43.516	75.558
		URH	73.051	129.831
		YMZ	53.831	93.209
2.	2010/01/14,18:46:25.57	HSS	25.214	43.775
		KNP	25.009	43.723
		KSR	20.816	36.650
		NOP	32.052	56.542
		SHR	35.440	61.621
		TMR	28.388	50.754
3.	2010/01/15,15:44:45.80	KNP	40.356	69.330
		KSR	31.945	55.802
		NMR	18.198	29.897
		NOP	49.354	82.137
		SHR	27.946	43.745
		URH	37.943	69.893
4.	2010/01/17,06:04:38.53	IYG	40.356	70.778
		KSK	37.870	62.644
		KSN	30.319	53.199
		SBT	50.291	85.842
		TYS	33.027	56.786
		YMZ	44.073	73.169

No.	Origin Time	Stasiun	Tp (s)	Ts (s)
5.	2010/02/16,01:57:14.20	GJM	47.326	89.766
		HID	43.011	75.106
		IYG	29.607	50.835
		KMU	35.330	58.473
		KNP	53.534	93.018
		KSK	51.324	87.149
		KSN	36.285	62.929
		KSR	42.966	74.966
		NMR	52.747	89.747
		NOP	63.026	107.564
		SHR	59.496	102.491
		TMR	34.215	57.546
		TYS	33.628	56.576
		URH	39.612	73.046
6.	2010/02/16,19:59:30.51	FUJ	25.661	41.260
		JIZ	18.608	31.788
		KNY	29.329	49.052
		KZS	20.952	35.838
		ONS	25.976	46.449
		SGN	20.616	35.204
		TSK	22.737	39.796
7.	2010/02/20,11:47:56.16	KNP	54.892	96.368
		KSR	49.004	81.845
		NKG	71.716	121.721
		NMR	34.512	58.726
		NOP	63.684	111.586
		SHR	40.766	67.643
		URH	57.389	96.047
8.	2010/02/28,08:17:41.45	ASI	45.171	77.861
		FUJ	48.017	80.337
		HJO	41.064	68.057
		JIZ	40.297	67.073
		KNY	51.098	89.546
		KSK	56.163	96.936
		KZK	58.341	102.177
		KZS	38.860	65.873

No.	Origin Time	Stasiun	Tp (s)	Ts (s)
		NAA	55.713	103.713
		ONS	45.354	78.595
		SBT	58.840	102.915
		SGN	41.857	72.664
		TSK	35.184	61.095
		TTO	52.634	91.890
		YMZ	41.397	71.035
9.	2010/02/28,22:07:46.69	ADM	37.767	63.611
		GJM	19.915	34.614
		IYG	22.767	39.488
		KSK	24.381	42.274
		KSN	20.489	35.520
		SBT	30.643	52.520
		TMR	31.853	55.042
		YMZ	39.901	69.917
10.	2010/03/06,13:31:11.06	KNP	47.150	80.384
		KSR	41.185	71.296
		NMR	26.705	47.649
		NOP	54.134	94.579
		SHR	33.478	57.982
		URH	49.803	85.231
11.	2010/03/12,17:32:06.40	AOG	42.278	42.278
		HJO	40.766	70.594
		JIZ	38.387	67.030
		KNY	49.829	86.375
		KSK	52.881	93.039
		KZK	55.286	96.390
		NAA	56.213	100.409
		ONS	42.278	74.751
		SBT	54.286	97.393
		SGN	40.435	69.757
		TSK	33.088	56.943
		TTO	51.506	87.755
		YMZ	37.956	68.397
12.	2010/03/13,12:46:26.75	KSK	19.218	32.110
		KSN	24.431	41.164

No.	Origin Time	Stasiun	Tp (s)	Ts (s)
		SBT	27.946	46.337
		TSK	29.187	50.089
		TYS	29.724	49.636
		YMZ	22.546	37.428
13.	2010/03/14,07:04:13.08	FUJ	43.343	73.123
		HJO	19.608	32.725
		JIZ	34.291	59.057
		KNY	43.823	75.200
		KZS	27.853	48.104
		SGN	40.421	70.094
14.	2010/03/14,08:08:04.18	ASI	35.537	60.368
		IYG	38.752	65.764
		KSK	19.671	32.978
		KSN	22.258	37.340
		SBT	31.023	51.166
		TSK	32.402	56.035
		TYS	26.782	46.304
		YMZ	25.434	42.002
15.	2010/03/27,20:02:34.42	FUJ	42.719	72.727
		HJO	17.960	31.441
		JIZ	34.652	58.905
		KNY	43.619	73.619
		SGN	40.254	70.041
16.	2010/04/05,09:36:33.92	ASI	32.079	57.487
		HRO	16.657	29.699
		KSK	29.427	49.339
		KSN	34.269	58.557
		SBT	35.069	62.479
		TSK	27.107	49.827
		YMZ	22.972	40.184
17.	2010/04/08,18:41:49.39	HID	27.208	47.376
		KMU	23.774	42.466
		KNP	20.348	34.127
		NMR	15.988	26.668
		SHR	20.853	34.593
		URH	14.636	25.414



No.	Origin Time	Stasiun	Tp (s)	Ts (s)
18.	2010/04/14,08:16:22.84	FUJ	57.911	100.536
		HJO	24.276	41.924
		JIZ	51.673	87.586
		KIS	63.738	110.077
		KNY	55.637	96.177
		NAA	63.824	111.616
		SGN	59.306	101.581
		TSK	64.931	114.282
		WTR	61.202	105.140
19.	2010/04/22,19:58:36.74	HID	67.710	121.358
		HSS	78.296	140.599
		KMU	69.525	115.084
		KNP	54.907	92.630
		KSR	46.520	83.248
		NKG	71.154	123.706
		NMR	33.766	58.691
		NOP	60.311	109.131
		SHR	41.175	71.084
		URH	56.310	97.373
20.	2010/04/23,01:59:13.78	ASI	75.448	130.515
		FUJ	68.467	115.651
		HJO	37.885	64.722
		JIZ	57.863	102.276
		KNY	69.685	115.486
		ONS	72.939	126.908
		SGN	65.392	113.206
		TSK	66.693	116.035
		YMZ	74.584	128.409
21.	2010/05/01,09:20:37.29	ADM	12.546	21.817
		ASI	17.953	30.847
		KSK	23.657	40.938
		KZK	11.722	20.091
		YMZ	19.684	33.829
22.	2010/05/12,18:55:31.94	FUJ	53.378	88.624
		HJO	21.954	36.399
		JIZ	44.584	75.453

No.	Origin Time	Stasiun	Tp (s)	Ts (s)
		KNY	52.4710	87.380
		NAA	60.481	105.005
		ONS	58.495	100.301
		SGN	51.961	88.096
		TSK	55.208	93.892
		TTO	61.961	103.881
23.	2010/05/18,08:33:44.85	HID	65.808	109.530
		HSS	78.542	128.984
		KMU	60.716	105.527
		KSR	43.010	73.747
		NKG	68.772	117.179
		NMR	28.951	49.274
		NOP	58.550	98.757
		SHR	37.339	61.771
		URH	51.927	87.540
24.	2010/05/31,16:34:56.75	ASI	95.619	165.039
		FUJ	81.471	145.403
		HJO	49.777	86.207
		JIZ	76.711	132.770
		KNY	82.920	143.250
		NAA	88.353	159.024
		ONS	90.047	158.763
		OSW	114.987	-
		SGN	83.839	148.024
		TSK	88.741	152.401
		TTO	94.691	161.377
		WTR	93.416	156.378
		YMZ	96.265	165.299
25.	2010/06/01,04:49:22.06	HRO	11.176	22.140
		KSK	18.724	30.849
		KSN	24.167	42.487
		SBT	27.776	47.786
		TSK	27.270	46.747
		TYS	29.800	53.051
		YMZ	20.591	34.525
26.	2010/06/05,05:22:03.29	GJM	89.258	154.128

No.	Origin Time	Stasiun	Tp (s)	Ts (s)
		IYG	72.841	126.348
		KMU	46.574	80.033
		KNP	37.924	83.992
		KSN	28.844	-
		KSR	49.748	-
		NKG	56.803	102.015
		NOP	44.492	81.715
		SHR	24.356	45.681
		TMR	67.631	116.242
		TYS	80.271	-
		URH	37.264	-
27.	2010/06/05,16:36:37.60	FUJ	52.987	89.315
		HJO	46.427	79.536
		JIZ	50.972	87.222
		KIS	51.446	88.393
		KMT	53.278	92.586
		KNY	50.216	86.732
		NAA	53.532	92.184
		SGN	55.244	94.388
		WTR	50.022	86.678
28.	2010/06/10,00:03:56.71	ASI	67.952	118.343
		FUJ	63.311	106.110
		HJO	37.355	62.082
		JIZ	54.343	92.903
		KNY	64.305	109.712
		ONS	65.750	114.378
		SGN	59.552	101.935
		TSK	59.198	102.035
		YMZ	65.950	113.667
29.	2010/06/13,03:32:57.02	IYG	42.038	74.835
		KSK	22.564	38.562
		KSN	26.189	42.361
		SBT	32.228	53.823
		TSK	28.865	47.065
		TYS	31.709	52.079
		YMZ	22.934	38.646

No.	Origin Time	Stasiun	Tp (s)	Ts (s)
30.	2010/06/27,21:03:25.38	HID	22.298	38.745
		HSS	24.193	41.800
		IMG	24.782	43.323
		IYG	25.004	42.565
		KMU	18.891	32.735
		TMR	13.467	21.751
		URH	31.187	53.894
31.	2010/06/28,12:07:23.67	ASI	93.768	163.575
		HJO	47.855	83.638
		JIZ	75.381	127.617
		KIS	91.575	159.257
		KMT	94.073	163.507
		KNY	81.585	141.525
		KZS	63.439	112.771
		NAA	89.827	155.419
		ONS	89.947	154.181
		SGN	82.440	143.765
		TSK	86.036	149.536
		TTO	91.963	-
		WTR	88.504	150.773
32.	2010/07/01,14:48:12.75	FUJ	61.495	106.088
		HJO	25.999	46.068
		JIZ	53.829	92.596
		KNY	59.532	102.200
		NAA	67.401	119.277
		ONS	69.515	120.624
		SGN	60.321	104.055
		TSK	66.896	114.939
		WTR	65.720	116.556
33.	2010/07/02,01:19:46.18	HID	73.558	129.065
		HSS	83.889	147.231
		KMU	71.224	127.031
		KNP	56.728	99.536
		KSR	52.460	91.745
		NKG	71.448	125.522
		NMR	38.667	66.699

No.	Origin Time	Stasiun	Tp (s)	Ts (s)
		NOP	64.304	112.960
		SHR	44.802	76.846
		URH	61.420	107.085
34.	2010/07/03,19:33:12.17	ADM	38.141	65.673
		GJM	20.625	35.955
		HRO	31.342	54.243
		IYG	22.511	37.103
		SBT	28.581	48.588
		TMR	36.522	62.634
		YMZ	37.431	65.384
35.	2010/07/05,00:53:14.49	HID	55.383	96.814
		HSS	67.590	115.823
		KMU	53.800	92.402
		KNP	40.684	67.345
		KSR	34.690	60.657
		NKG	58.046	101.258
		NMR	20.714	33.233
		NOP	48.218	82.460
		SHR	27.369	45.966
		URH	43.213	71.618
36.	2010/07/05,15:48:36.02	ABU	45.278	79.783
		KNM	45.970	82.011
		NAA	47.754	85.269
		NOK	48.947	87.322
		SRN	44.950	78.666
		TGA	44.650	79.260
		WJM	50.835	90.773
		WTR	48.311	85.580
		YAS	43.975	78.146
		YZK	46.087	82.745
37.	2010/07/08,12:23:27.20	HID	25.360	45.976
		KMU	20.748	37.002
		KNP	23.601	39.729
		NMR	20.557	34.987
		SHR	25.989	43.073
		URH	14.361	25.214

No.	Origin Time	Stasiun	Tp (s)	Ts (s)
38.	2010/07/20,03:25:43.44	HID	71.072	123.219
		HSS	83.249	143.262
		KMU	68.570	120.152
		KNP	55.506	92.974
		KSR	49.538	86.187
		NKG	70.044	122.678
		NMR	35.269	61.205
		NOP	60.598	106.128
		SHR	41.538	74.013
		URH	58.835	101.488
39.	2010/07/22,21:06:31.49	ASI	19.650	34.293
		FUJ	31.672	49.547
		HRO	22.897	39.281
		JIZ	26.556	44.884
		ONS	21.238	36.290
		SGN	24.210	38.350
		YMZ	18.775	31.845
40.	2010/07/26,23:31:03.16	GJM	33.399	56.051
		HRO	33.098	56.975
		IYG	22.095	36.574
		KSK	26.025	45.050
		SBT	40.026	67.451
		TMR	36.972	62.127
		YMZ	41.737	70.276
41.	2010/07/31,03:52:55.92	FUJ	53.083	92.654
		HJO	35.493	59.275
		JIZ	49.277	85.493
		KIS	53.823	-
		KMT	55.944	96.906
		KNY	49.856	87.615
		KZS	42.300	72.449
		NAA	55.817	95.946
		WTR	52.582	-
42.	2010/08/04,20:09:36.90	HID	70.775	116.875
		HSS	80.099	136.387
		KMU	68.198	114.489

No.	Origin Time	Stasiun	Tp (s)	Ts (s)
		KNP	54.547	92.608
		KSR	48.244	81.836
		NKG	68.435	118.090
		NMR	34.057	57.474
		NOP	59.423	102.323
		SHR	39.834	66.318
		URH	56.858	97.127
43.	2010/08/10,05:50:34.64	GJM	43.612	71.045
		IYG	28.458	45.254
		KSK	40.546	69.615
		KSN	27.579	45.529
		TMR	38.579	65.661
		TYS	26.166	43.358
44.	2010/08/10,16:00:39.28	GJM	42.994	72.272
		HID	53.903	90.596
		IYG	27.442	45.940
		KMU	44.824	76.430
		KSK	40.426	67.773
		KSN	27.083	44.431
		SBT	53.952	91.435
		TMR	37.200	61.447
		TYS	25.733	42.254
		URH	52.979	91.947
45.	2010/08/13,20:19:44.61	ASI	71.387	122.631
		FUJ	67.732	113.815
		HJO	40.227	67.136
		JIZ	58.148	98.871
		KNY	68.831	115.393
		ONS	69.966	118.576
		SGN	63.497	107.749
		TSK	63.419	106.506
		YMZ	69.892	-
46.	2010/08/26,15:08:04.23	FUJ	42.486	74.914
		NAA	39.062	68.545
		TGA	39.986	69.597
		TTO	39.133	67.523

No.	Origin Time	Stasiun	Tp (s)	Ts (s)
		WJM	40.173	70.181
		YAS	42.053	73.241
47.	2010/08/31,02:30:31.56	IYG	30.785	55.551
		KSK	39.229	65.283
		KSN	37.476	67.799
		SBT	38.878	64.028
		TMR	30.485	52.168
		TYS	34.675	58.754
48.	2010/09/03,21:15:29.38	HID	36.300	63.081
		KMU	33.008	54.492
		KNP	28.511	48.887
		NOP	38.298	67.679
		SHR	23.309	38.416
		URH	23.072	40.157
49.	2010/09/13,23:05:12.56	FUJ	67.714	116.992
		HJO	35.760	59.908
		JIZ	59.126	100.091
		KNM	83.711	141.495
		KNY	67.375	112.981
		NAA	76.208	128.138
		ONS	73.118	122.360
		SGN	66.136	110.365
		TSK	67.387	113.223
		TTO	75.580	129.392
		WTR	78.435	133.012
		YMZ	75.034	127.860
50.	2010/09/17,06:47:30.90	FUJ	79.720	135.337
		HJO	47.209	78.682
		JIZ	71.272	122.020
		KNY	79.748	135.297
		SGN	77.231	131.638
		TSK	78.780	137.581
		TTO	80.386	150.638
51.	2010/09/17,17:58:36.63	FUJ	95.334	161.008
		HJO	60.730	103.143
		JIZ	86.775	147.138



No.	Origin Time	Stasiun	Tp (s)	Ts (s)
		KNY	-	148.098
		OSW	-	80.111
		SGN	93.225	159.118
		TSK	95.616	163.717
52.	2010/09/21,20:15:10.93	GJM	28.297	49.254
		IYG	34.117	58.511
		KSK	43.429	76.429
		KSN	39.922	69.599
		TMR	32.994	57.074
		TYS	37.532	64.811
53.	2010/09/27,16:13:38.72	KMU	37.571	65.479
		KNP	27.342	45.6780
		KSR	21.849	37.178
		NOP	35.538	61.101
		SHR	18.745	31.742
		URH	28.766	48.908
54.	2010/09/29,03:01:57.60	ADM	26.406	44.446
		ASI	16.252	29.462
		KSK	20.387	36.149
		KSN	34.199	61.561
		KZK	23.464	39.824
		ONS	27.312	46.925
		SBT	16.026	26.339
		SGN	35.129	62.431
		TSK	20.102	34.107
55.	2010/09/29,07:59:55.98	ADM	26.667	45.928
		JIZ	42.677	71.894
		KSK	21.132	34.168
		KSN	37.442	61.281
		KZK	23.558	40.471
		ONS	26.695	45.233
		SGN	37.033	60.164
		TSK	20.575	33.042
		TTO	38.516	62.508
		TYS	42.328	71.153
		WJM	40.576	69.040

<b>No.</b>	<b><i>Origin Time</i></b>	<b>Stasiun</b>	<b>Tp (s)</b>	<b>Ts (s)</b>
56.	2010/09/30,12:47:09.52	ASI	24.123	39.247
		KSK	21.532	38.084
		KSN	30.970	51.445
		SBT	26.800	-
		TSK	20.402	33.889
		YMZ	14.958	23.921
57.	2010/10/03,00:26:52.83	ADM	14.500	24.705
		ASI	18.289	29.776
		ONS	20.086	33.051
		SBT	21.387	35.108
		TTO	24.725	40.983
		WJM	20.009	35.504
58.	2010/10/10,02:27:49.65	HJO	-	74.296
		JIZ	-	120.870
		KNY	-	128.360
		ONS	85.538	146.084
		SGN	78.438	131.214
		TSK	80.137	138.838
		WTR	79.708	143.605
59.	2010/10/14,09:41:34.28	HID	67.491	114.889
		IYG	91.938	159.938
		KMU	66.285	113.196
		KNP	50.983	87.932
		KSN	104.713	180.479
		KSR	46.076	78.600
		NKG	66.765	115.685
		NMR	31.661	53.836
		NOP	57.114	101.114
		SHR	37.673	62.989
		TMR	86.855	148.630
		TYS	100.634	172.988
		URH	54.446	94.180
60.	2010/10/14,13:58:55.50	GJM	48.163	87.172
		HSS	25.076	42.958
		IYG	37.613	65.443
		KNP	26.640	44.874

No.	Origin Time	Stasiun	Tp (s)	Ts (s)
		KSN	52.057	91.123
		KSR	21.748	37.446
		NKG	41.714	70.985
		NMR	34.824	59.248
		NOP	33.278	55.362
		SHR	36.839	62.783
		TMR	28.610	48.341
		TYS	46.733	82.339
61.	2010/11/14,06:10:27.08	AOG	45.848	87.325
		ASI	48.370	83.899
		HJO	30.570	53.521
		JIZ	36.750	64.191
		KNM	61.789	106.958
		KNY	47.378	81.028
		KSK	62.709	110.616
		KZK	61.964	105.319
		NAA	57.137	98.281
		ONS	47.392	81.936
		SGN	40.636	71.375
		TSK	38.410	67.598
		TTO	52.350	88.522
		WTR	61.327	109.413
		YMZ	46.372	80.570
62.	2010/11/19,04:01:58.77	HID	37.324	62.209
		KMU	34.081	61.397
		KNP	26.198	44.340
		KSR	16.387	27.003
		NKG	47.525	80.896
		NOP	35.948	65.152
		SHR	18.412	29.923
		TMR	56.772	95.488
		URH	24.564	41.544
63.	2010/11/24,11:09:10.71	ASI	22.539	37.730
		HRO	17.756	28.748
		KSK	34.072	60.594
		ONS	26.551	44.573

No.	Origin Time	Stasiun	Tp (s)	Ts (s)
		SGN	30.132	48.681
		TSK	13.967	22.590
		YMZ	17.103	27.843
64.	2010/12/06,07:30:29.85	HID	37.475	64.484
		IYG	27.055	46.280
		KMU	27.414	47.760
		KSN	39.687	65.250
		TMR	26.895	45.487
		TYS	34.593	55.303
		URH	36.845	63.876
65.	2010/12/07,02:27:13.52	HID	68.529	117.854
		KMU	66.185	111.169
		KNP	52.085	88.085
		KSR	45.872	79.180
		NKG	65.558	116.999
		NMR	31.701	54.499
		NOP	57.783	101.950
		SHR	37.849	63.643
		TMR	87.172	151.191
		URH	54.851	93.930
66.	2010/12/09,16:21:02.19	GJM	49.798	83.199
		IYG	34.274	60.100
		KSK	43.940	76.278
		KSN	31.798	53.578
		TMR	45.199	80.510
		TYS	31.357	55.841
67.	2010/12/15,05:43:46.42	HID	29.188	50.228
		IYG	42.412	74.172
		KMU	20.706	37.780
		KNP	30.916	52.966
		KSR	18.616	31.439
		NMR	27.555	46.748
		NOP	42.257	72.427
		SHR	34.748	59.847
		TMR	38.546	66.825
		URH	20.132	36.569

No.	<i>Origin Time</i>	Stasiun	Tp (s)	Ts (s)
68.	2010/12/15,07:37:19.98	HID	31.355	52.958
		IYG	23.629	39.692
		KMU	22.392	36.840
		TMR	20.315	33.374
		TYS	32.737	56.285
		URH	33.625	55.764
69.	2010/12/31,23:01:02.17	ASI	21.520	34.445
		KSK	26.597	45.789
		ONS	27.128	46.552
		SBT	28.972	49.448
		TSK	15.168	25.896
		YMZ	12.663	22.332

## **LAMPIRAN 4**

### **BIOGRAFI PENULIS**



Penulis dilahirkan di Surabaya, 26 Maret 1991 dengan nama Indrawati Wilujeng. Penulis merupakan puteri kedua dari pasangan Bapak Tariman dan Ibu Murti. Penulis menempuh pendidikan formal di SD Negeri Gading VIII Surabaya(1997-2003), SMP Negeri 9 Surabaya (2003-2006), SMA Negeri 1 Surabaya (2006-2009), dan kemudian melanjutkan studi S1 di Universitas Negeri Surabaya (2009-2013). Setelah lulus S1 dan mendapatkan gelar sarjana pendidikan penulis segera melanjutkan pendidikan dengan menempuh Pendidikan Magister di S2 Fisika Institut Teknologi Sepuluh Nopember dengan bantuan dana dari Beasiswa Pendidikan Pascasarjana Dalam Negeri (BPP-DN). Akhir kata, jika pembaca menemukan hal-hal yang ingin didiskusikan dapat menghubungi melalui email ke [indrawati.wilujeng@yahoo.co.id](mailto:indrawati.wilujeng@yahoo.co.id) atau [indrawati13@mhs.physics.its.ac.id](mailto:indrawati13@mhs.physics.its.ac.id).

## BIOGRAFI PENULIS



Penulis dilahirkan di Surabaya, 26 Maret 1991 dengan nama Indrawati Wilujeng. Penulis merupakan puteri kedua dari pasangan Bapak Tariman dan Ibu Murti. Penulis menempuh pendidikan formal di SD Negeri Gading VIII Surabaya(1997-2003), SMP Negeri 9 Surabaya (2003-2006), SMA Negeri 1 Surabaya (2006-2009), dan kemudian melanjutkan studi S1 di Universitas Negeri Surabaya (2009-2013). Setelah lulus S1 dan mendapatkan gelar sarjana pendidikan penulis segera melanjutkan pendidikan dengan menempuh Pendidikan Magister di S2 Fisika Institut Teknologi Sepuluh Nopember dengan bantuan dana dari Beasiswa Pendidikan Pascasarjana Dalam Negeri (BPP-DN). Akhir kata, jika pembaca menemukan hal-hal yang ingin didiskusikan dapat menghubungi melalui email ke [indrawati.wilujeng@yahoo.co.id](mailto:indrawati.wilujeng@yahoo.co.id) atau [indrawati13@mhs.physics.its.ac.id](mailto:indrawati13@mhs.physics.its.ac.id).